

静钻根植桩抗压抗拔承载性能试验研究

黄晟¹,周佳锦^{1†},龚晓南¹,俞建霖¹,舒佳明²,王孟波²

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心,浙江 杭州 310058;

2. 中淳高科股份有限公司,浙江 宁波 315000)

摘要:通过一组静钻根植桩的现场抗压抗拔静载试验,研究了抗压和抗拔状态下静钻根植桩的承载性能.对两根试桩的荷载位移曲线进行了比较分析,并采用有效应力法对试桩的极限侧摩阻力进行计算.试验结果表明:受桩周土体应力状态和桩身泊松效应影响,静钻根植抗拔桩的极限侧摩阻力小于抗压桩的极限侧摩阻力;抗拔桩侧摩阻力完全发挥时的桩顶位置值大于抗压桩侧摩阻力完全发挥时的桩顶位置值;采用有效应力法计算土层的极限侧摩阻力时,需要考虑土层的极限深度(或极限竖向有效应力),当土层深度超过极限值时,采用有效应力法计算土层的极限侧摩阻力需采用极限深度时对应的竖向有效应力值.

关键词:静钻根植桩;竹节桩;承载力;抗拔系数

中图分类号:TU47

文献标志码:A

Experimental Study on Bearing Capacity of Pre-bored Grouted Planted Pile under Compression and Tension

HUANG Sheng¹, ZHOU Jiajin^{1†}, GONG Xiaonan¹, YU Jianlin¹, SHU Jiaming², WANG Mengbo²

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. ZCONE High-tech Pile Industry Holdings Co., Ltd, Ningbo 315000, China)

Abstract: The bearing capacity of pre-bored grouted planted (PGP) pile under compression and tension is investigated based on a group of field compression and tension tests. The load-displacement curves of two test piles are compared and analyzed, and the effective stress method is adopted to estimate the shaft capacity of the test piles. The test results show that: the ultimate shaft resistance of PGP pile under tension is smaller than the ultimate shaft resistance of PGP pile under compression, due to the different stress conditions of the soil around the pile and the Poisson's ratio of pile shaft; the pile head displacement needed to fully mobilize the shaft resistance of test pile under tension is larger than the displacement needed to fully mobilize the shaft resistance of test pile under compression; a ultimate depth (or ultimate vertical effective stress) exists when the effective stress method is adopted to calculate the ultimate skin friction of the soil layers, and the value of the vertical effective stress corresponding to the ultimate depth should be adopted in the calculation of ultimate skin friction in effective stress method.

Key words: pre-bored grouted planted pile; nodular pile; bearing capacity; uplift coefficient

* 收稿日期:2019-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578498,51978610), National Natural Science Foundation of China(51578498,51978610)

作者简介:黄晟(1995—),男,浙江衢州人,浙江大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail:zhoujiajin@zju.edu.cn

静钻根植桩是一种由预应力高强混凝土桩和桩周水泥土组合而成的一种新型组合桩基础,目前在东南沿海地区已经有了一些成功应用,并在软土地基中表现出了较好的承载性能^[1].笔者课题组通过静钻根植桩的现场静载试验研究发现静钻根植桩在软土地基中的承载性能优于传统钻孔灌注桩,且静钻根植桩施工过程中的泥浆排放量相比钻孔灌注桩也有了大幅度减小^[2-3].由于静钻根植桩桩身结构的复杂性,其荷载传递机理与传统的预应力管桩和钻孔灌注桩均有所不同,通过静钻根植桩的模型试验和桩土接触面试验研究发现静钻根植桩的桩侧摩擦性能受预应力桩-水泥土-桩周土体接触面控制,桩端承载性能受桩端水泥土扩大头影响较大,且水泥土强度的改变会影响桩基的承载性能^[4-6].

目前对静钻根植桩的研究主要集中在抗压承载性能的研究,对其抗拔承载性能的研究还较少.随着我国城市建设的高速发展,对地下空间的开发和利用的需求逐渐增大,而东南沿海地区地下水位较高,地下建筑会受到较大的上浮力作用,使得抗拔桩在地下工程中得到了广泛应用.实际工程中在计算桩基的抗拔承载力时,一般通过引入抗拔系数修正各土层的抗压极限侧摩阻力作为抗拔极限侧摩阻力.建筑桩基技术规范^[7]中给出了不同土层中抗拔系数的推荐值:砂土层:0.50~0.70;黏土、粉土层:0.70~0.80. Jardine 等^[8]指出砂土中挤土桩在上拔荷载作用下的初始径向有效压力为下压荷载作用下径向有效压力的0.8倍,而黏土中桩基侧摩阻力不受加载方向的影响. De Nicola 等^[9]认为桩侧摩阻力的抗拔系数主要受不同加载方向下桩身的泊松效应以及桩周土体中的有效应力变化的影响,桩基侧摩阻力的抗拔系数范围为0.70~0.85,若不考虑桩基施工过程中产生的桩端残余应力会高估抗压桩的侧摩阻力,则使得抗拔系数偏小^[10].静钻根植桩由预应力桩和桩周水泥土所组成,其水泥土-桩周土体接触面与桩侧后注浆桩基的桩土接触面比较接近,而桩侧后注浆抗拔桩的侧摩阻力相比传统抗拔桩有了较大程度的提高^[11-12].静钻根植桩现场试验结果也证明了其抗拔承载性能优于传统抗拔桩^[13].静钻根植桩是由预应力桩和桩周水泥土所组成的组合桩基,不同加载方向条件下桩身的泊松效应以及桩周土体中的有效应力变化对其侧阻抗拔系数的影响可能与传统预应力桩和钻孔灌注桩有所不同,需对此展开研究.

本文通过一组静钻根植桩的抗压抗拔破坏性现场静载试验对其抗压抗拔承载性能进行了研究,并

对抗压抗拔荷载作用下静钻根植桩的桩侧抗拔系数进行了分析与研究.

1 试验概况

为了对静钻根植桩的抗压抗拔承载性能进行研究,基于某实际工程项目分别对1根抗压桩和1根抗拔桩进行了现场静载试验,且试桩均加载至破坏状态.静钻根植桩试桩示意图如图1所示,抗压桩中预应力桩为800 mm直径预应力管桩和600 mm直径(竹节处直径为800 mm)预应力竹节桩,钻孔直径为850 mm,即桩周水泥土直径为850 mm,抗压桩桩长为73 m,其中预应力管桩段长度为43 m,预应力竹节桩段长度为30 m.静钻根植抗拔桩中预应力桩也为800 mm预应力管桩和600 mm(竹节处直径为800 mm)预应力竹节桩,桩周水泥土直径也为850 mm;试桩桩长为62 m,其中预应力管桩段长度为32 m,预应力竹节桩段长度为30 m.

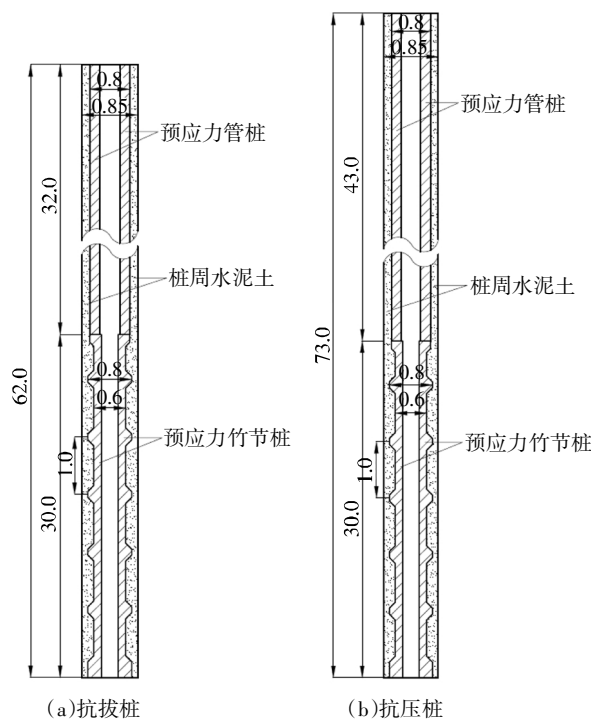


图1 试桩示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic of test piles(unit:m)

静钻根植桩施工现场如图2所示.从图中可以看到静钻根植桩施工过程中首先采用钻机进行钻孔注浆,钻机的钻杆在注浆过程中作为注浆管使用.本次试验的施工现场位于居民区周围,旁边有许多高层建筑物,静钻根植桩施工过程没有对周边建筑物产生影响,证明了静钻根植桩施工过程无挤土效应.



图 2 静钻根植桩现场施工图
Fig.2 Photograph of pre-bored grouted
planted pile installation process

试验场地土层分布及土体物理力学指标如表 1 所示,表中 w 为土体含水率, γ 为土体天然重度, e 为孔隙比, E_{s1-2} 为土体压缩模量, c 、 φ 分别为通过固结不排水试验测得的土体黏聚力和内摩擦角. 表 1 中给出的抗压桩和抗拔桩周围的各土体厚度由试桩桩孔附近的取土样钻孔数据得到,由表 1 可知,抗压桩的桩端位于 8-1 粉质黏土层中,而抗拔桩的桩端位于 6-3 粉质黏土层中.

表 1 土层分布及土体性质
Tab.1 Soil profiles and properties

层号	土层名称	土层厚度/m		$w/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e	E_{s1-2}/MPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
		抗压桩	抗拔桩						
1-0	杂填土	1.2	0.8		17.5	—	—	—	—
1-1	黏土	1.7	1.1	38.8	18.3	1.092	3.29	29.3	12.5
1-2	黏土	0.9	2.1	40.9	17.9	1.109	2.92	16.9	9.6
2-1	淤泥	9.2	7	53.8	16.9	1.501	2.09	12.4	6.7
2-2	淤泥质粉质黏土	1.6	2.5	46.4	17.4	1.284	2.36	13.9	8.2
3-1	含黏性土粉砂	3.4	5	25.5	19.8	0.708	7.62	11.0	28.4
3-2	粉质黏土	7.8	6.5	33.2	18.4	0.971	3.80	18.9	11.0
3-3	淤泥质黏土	1.4	2.2	45.6	17.6	1.240	2.89	18.3	7.9
4-1	黏土	3.6	3.7	28.6	19.5	0.808	6.28	33.7	14.9
4-2	粉质黏土	6.2	6.6	32.1	18.9	0.901	5.70	29.9	15.2
4-3	砂质粉土	4.2	5.5	31.0	19.0	0.862	8.12	16.8	20.5
6-1	粉质黏土	4.8	3.5	34.8	18.6	0.977	5.05	26.3	11.3
6-2	黏土	4.7	3.6	39.6	18.0	1.127	5.05	26.7	13.0
6-3	粉质黏土	13.3	12	30.5	18.9	0.879	5.73	28.7	15.8
6-4	粉质黏土	2.7	3.4	34.5	18.6	0.976	4.67	31.4	14.1
7	粉砂	3.1	4.6	20.2	19.8	0.623	11.04	14.5	32.1
8-1	粉质黏土	6.7	5.4	26.2	19.7	0.755	7.83	45.8	19.5
8-2	粉质黏土	7	9.1	25.8	19.5	0.769	7.68	49.7	20.0
9	砾砂	12.7	7.4	16.1	21.3	0.448	8.52	10.5	35.8

2 现场静载试验

单桩竖向抗压抗拔静载试验均按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[14]进行,采用慢速维持荷载法进行加载,试桩抗压抗拔静载试验示意图

如图 3 所示. 图 3(a)为抗压桩静载试验示意图,使用大型伞形架上置混凝土预制块作为反力装置,桩顶对称安装 4 只量程为 50 mm、精度为 0.1% FS 的位移传感器以测读桩顶位移;采用分级加载方式进行试验,第一级加载值为要求最大试验荷载的 1/6,以后各级加载值均为要求最大试验荷载的 1/12,每级

加载后按时间间隔分别为 5 min、10 min、15 min、15 min 测读桩顶沉降量,以后每隔 30 min 测读桩顶沉降量,每一小时内的桩顶沉降量不超过 0.1 mm,并连续出现两次,才可施加下一级荷载.抗拔桩静载试验示意图如图 3(b)所示,使用千斤顶横梁反力装置,混凝土垫块做支撑,桩顶对称安装 4 只量程为 50 mm、精度为 0.1%FS 的位移传感器以测读桩顶上拔量;采用分级加载方式进行试验,加载方式与抗压桩加载方式一致.

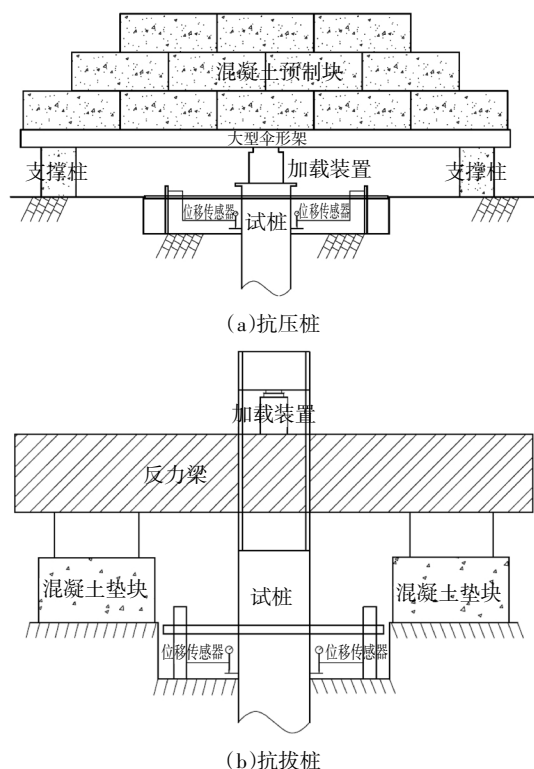


图3 静载试验示意图

Fig.3 Schematic of static load tests

3 静载试验结果

通过对现场试验结果进行整理得到的静钻根植抗压桩的荷载位移曲线如图 4 所示.从图 4 中可以看到,抗压桩的荷载位移曲线可以划分为三个部分:当桩顶荷载较小时,桩顶位移几乎随着桩顶荷载的增加而线性增长,且桩顶位移增长幅度较小,当桩顶荷载增加到 4 833 kN 时,桩顶位移为 6.84 mm;当桩顶荷载超过 4 833 kN 时,桩顶位移随着桩顶荷载的增加而稳步增长,且位移增长幅度逐渐增加,当桩顶荷载为 10 633 kN 时,桩顶位移值达到 38.73 mm;当桩顶荷载增加到 11 600 kN 时,桩顶位移值突然增加到 100 mm,桩端发生刺入破坏.根据《建筑基桩检测技术规范》^[14],静钻根植抗压桩的极限承载力为 10 633 kN.

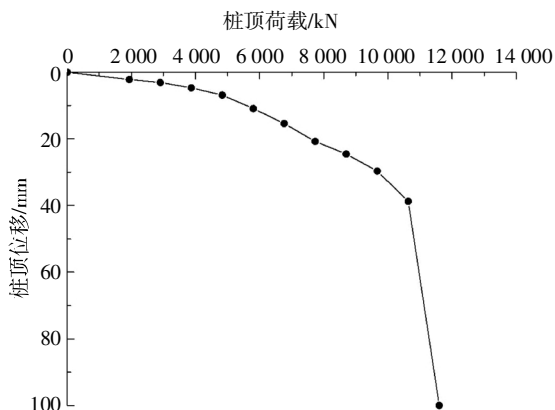


图4 抗压桩荷载位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of test pile under compression

静钻根植抗拔桩的荷载位移曲线如图 5 所示.从图 5 中可以看到,抗拔桩的荷载位移曲线与抗压桩的荷载位移曲线的形式比较接近,在加载初期阶段桩顶位移随着顶荷载的增加而线性增长,当桩顶荷载增加到 2 880 kN 时,桩顶位移为 10.97 mm;此后随着桩顶荷载的增加桩顶位移的增长幅度明显增大,当桩顶荷载增加到 3 680 kN 时,桩顶位移增加到 31.44 mm;当桩顶荷载增加到 3 840 kN 时,荷载施加 45 min 后桩顶突然上拔,且 15 min 后桩顶位移值达到 65.23 mm,此时本级荷载作用下的桩顶位移增加量已大于上一级荷载作用下桩顶位移增加量的 5 倍,且桩顶位移一直在增加无法保持稳定,图 5 中给出的桩顶荷载为 3 680 kN 时的桩顶位移为 100 mm,实际桩顶位移值大于 100 mm.根据《建筑基桩检测技术规范》^[14],静钻根植抗拔桩的极限承载力为 3 680 kN.

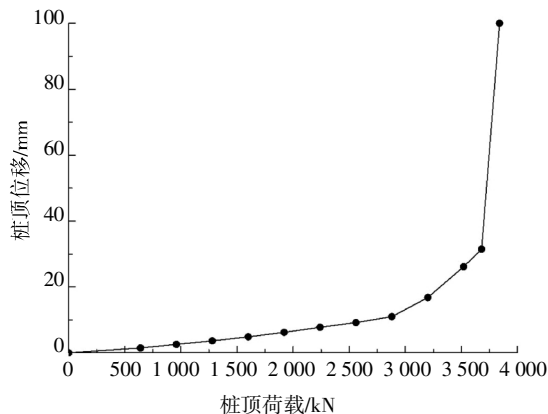


图5 抗拔桩荷载位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of test piles under tension

在桩身预埋应力或者应变测试仪器可以测得试验过程中的桩身轴力,从而得到不同土层中桩基所受的极限侧摩阻力,是进行桩侧摩擦性能研究的一

种有效手段. 然而预应力高强混凝土竹节桩在制作过程中需要进行高速离心, 传感器的导线很容易在该过程中损坏, 考虑到桩身预埋传感器难度较大且预埋的传感器在试验过程中能够正常工作的比例不高, 本次试验中试桩桩身没有预埋应力或者应变测试仪器. 由于本次试验中没有直接测得抗压桩的桩侧摩阻力和桩端阻力值, 需要根据试桩周围的土层分布情况分别计算各土层中试桩的桩侧摩阻力以及桩端阻力. 有限应力法给出的桩侧摩阻力计算公式如下:

$$\tau_f = K \cdot \sigma_{\sigma_0} \cdot \tan \delta \quad (1)$$

式中: K 为侧向土压力系数; δ 为桩土接触面摩擦角; σ_{σ_0} 为竖向有效应力.

侧向土压力系数 K 一般通过经验系数乘以静止土压力 K_0 进行估算, Kuhlavy^[15]建议非挤土桩的 K/K_0 比值为 0.7~1.2, 挤土桩的 K/K_0 比值为 1.0~2.0. 桩土接触面的摩擦角 δ 通常根据桩身材料的不同, 将桩周土体内摩擦角 φ 乘以一个折减系数作为接触面的摩擦角, Kuhlavy^[15]建议光滑混凝土桩的 δ/φ 比值为 0.8~1.0. 静钻根植桩施工过程中不会产生挤土效应, 同时会有一部分水泥土(水泥浆)渗入到桩周土体中, 提高了静钻根植桩桩土接触面的摩擦性能. 作者通过桩身预埋钢筋应力计的静钻根植桩的现场静载试验对不同土层中静钻根植桩的桩侧摩擦性能进行研究, 发现当桩土接触面处的侧向土压力值与静止土压力值相同, 即 $K/K_0 = 1.0$, 且水泥土-桩周土体接触面的摩擦角取桩周土体摩擦角时计算结果比较合理^[16].

根据表 1 中给出的土层分布, 各土层土体重度以及土体的内摩擦角数值, 进行计算所得的各土层极限侧摩阻力值如表 2 所示. 试验场地地下水位高度在地表以下 1 m 左右. 表 2 中的推荐值为根据土层分布和性质, 参照《建筑桩基技术规范》^[7]给出的钻孔灌注桩的各土层极限侧摩阻力经验值.

从表 2 中可以看到, 当土层埋深较浅时, 规范中给出的极限侧摩阻力的经验值大于公式(1)计算所得的极限侧摩阻力值, 这是由于有效应力法计算极限侧摩阻力时, 极限侧摩阻力值与土层所受的竖向有效应力成正比, 当土层埋深较浅时, 土层所受竖向有效应力较小, 因此计算所得的极限侧摩阻力值也较小. 当竖向有效应力增加到 70 kPa 时, 即在 2-1 淤泥层中, 计算所得的极限侧摩阻力值与规范推荐的经验值比较接近, 此后随着竖向有效应力的增加, 各土层的极限侧摩阻力计算值与规范推荐值都比较

表 2 各土层极限侧摩阻力计算值
Tab.2 Calculated ultimate skin frictions
of different soil layers

层号	土层名称	内摩擦角/(°)	极限侧摩阻力值/kPa		推荐值/kPa
			抗压桩	抗拔桩	
1-1	黏土	12.5	4.8	3.2	30
1-2	黏土	9.6	5.4	4.4	24
2-1	淤泥	6.7	7.6	6.6	10
2-2	淤泥质粉质黏土	8.2	13.7	11.9	16
3-1	含黏性土粉砂	28.4	37.8	36.7	36
3-2	粉质黏土	11.0	28.6	28.4	22
3-3	淤泥质黏土	7.9	26.3	25.8	20
4-1	黏土	14.9	47.7	47.6	56
4-2	粉质黏土	15.2	57.2	57.6	46
4-3	砂质粉土	20.5	80.5 (68.0)	82.8 (68.0)	50
6-1	粉质黏土	11.3	81.5 (45.0)	83.8 (45.0)	36
6-2	黏土	13.0	82.5 (50.1)	84.8 (50.1)	44
6-3	粉质黏土	15.8	83.5 (57.6)	85.8 (57.6)	54
6-4	粉质黏土	14.1	84.5 (53.2)	—	52
7	粉砂	32.1	85.5 (82.3)	—	84
8-1	粉质黏土	19.5	86.5 (66.0)	—	76

接近; 然而当土层所受竖向应力增加到 330 kPa, 即到达 4-3 砂质粉土层时, 计算所得的极限侧摩阻力值远大于规范推荐的经验值. Fleming 等^[10]、Vesic^[17]都曾指出计算桩侧阻力和桩端阻力时都存在一个极限深度, 当土层埋深超过这一极限深度(或极限竖向有效应力)时, 土层所能提供的极限侧摩阻力和端阻力不会随着土层所受竖向有效应力的增加而增加. 目前对软黏土地基中桩基极限侧摩阻力计算时的土层极限深度(或极限竖向有效应力)的研究还较少, 软黏土地基中的侧阻极限深度还未知, 本次静载试验结果显示, 当竖向有效应力值超过 280 kPa 时, 计算所得的极限侧摩阻力值均远大于规范推荐值. 将 280 kPa 作为土层所受的竖向有效应力计算 4-3 砂质粉土层及其以下土层的极限侧摩阻力时, 计算结果如表 2 括号中数值所示, 可以看到除了 4-3 砂质粉土层极限侧摩阻力计算值相比于规范推荐值较大外, 其他土层中的侧阻计算值与规范推荐值都比较接近. 将 280 kPa 作为计算侧阻时的极限竖向有效应力, 静钻根植抗压桩的极限侧摩阻力计算值和规范推荐值

分别为 8 362 kN 和 7 876 kN. 静钻根植桩施工过程中无挤土效应, 桩基施工完成后桩端基本不存在残余应力, 根据《建筑桩基技术规范》^[7], 8-1 粉质黏土层中钻孔灌注桩的桩端极限承载力为 3 000 kPa, 将其作为静钻根植抗压桩的桩端极限承载力, 计算所得的抗压桩的桩端极限承载力为 1 701 kN. 抗压桩的实测极限承载力为 10 633 kN, 减去桩端极限承载力 1 701 kN, 桩侧摩阻力为 8 932 kN. 因此, 抗压桩实测桩侧摩阻力与有效应力法计算和规范推荐值计算所得的桩侧摩阻力的比值分别为 1.07 和 1.13, 而规范推荐值计算时采用了钻孔灌注桩的极限侧摩阻力值, 因此可认为本次试验中静钻根植抗压桩的桩侧摩擦性能优于钻孔灌注桩, 与其他现场试验中得出的结论一致^[11-12].

表 2 中给出的静钻根植抗拔桩的极限侧摩阻力为抗压状态下各土层所能提供的极限侧摩阻力值, 未引入抗拔系数进行修正. 由表 2 中给出的各土层极限侧摩阻力计算值和规范推荐值计算所得的抗拔桩的极限侧摩阻力分别为 6 585 kN 和 6 067 kN. 实测的静钻根植抗拔桩的极限承载力为 3 680 kN, 抗拔桩不存在桩端阻力, 因此抗拔桩实测桩侧摩阻力与有效应力法计算和规范推荐值计算所得的桩侧摩阻力的比值分别为 0.56 和 0.61. 抗压桩实测桩侧摩阻力与规范推荐值计算所得的桩侧摩阻力的比值为 1.13, 而抗拔桩实测桩侧摩阻力与规范推荐值计算所得的桩侧摩阻力的比值仅 0.61, 说明抗拔状态下静钻根植桩的极限侧摩阻力远小于抗压状态下的极限侧摩阻力. 这很可能是由于加载方向不同使得桩周土体的应力状态以及桩身参数发生了变化. 抗压桩荷载传递过程中桩周土体受到试桩桩身竖直向下的荷载作用, 而抗拔桩加载过程中桩周土体受到桩身竖直向上的荷载作用, 不同加载方向作用下桩周土体的应力状态不同, 抗压桩桩周土体的侧向压力大于抗拔桩桩周土体的侧向压力. 在不同加载方向作用下受桩身泊松效应的影响试桩桩身参数也有所不同, 抗压桩受竖直向下的荷载作用, 试桩桩身直径会有所增加, 而抗拔桩受上拔荷载作用, 桩身直径会有所减小, 使得抗拔桩桩土接触面的压力小于抗压桩桩土接触面压力. 因此, 静钻根植抗拔桩的极限侧摩阻力小于抗压桩的极限侧摩阻力.

将抗压桩和抗拔桩的桩顶荷载分别除以规范推荐值计算所得的极限侧摩阻力, 与桩顶位移/桩身直径比值关系曲线如图 6 所示. 从图中可以看到, 抗拔桩的桩侧摩阻力随着桩顶位移的增加而增加, 且侧

摩阻力增加幅度随着桩顶位移的增加而有所减小, 当桩顶位移达到 $0.037D$ (D 为桩身直径) 时, 桩侧摩阻力达到极限值, 为 0.61 倍计算极限侧摩阻力值. 抗压桩在加载过程中存在桩端阻力, 由桩基础的荷载传递路径可知, 桩侧摩阻力随着桩土相对位移的发展自桩顶至桩端逐渐发挥, 且桩侧摩阻力先于桩端阻力发挥. Fleming 等^[10]指出桩侧摩阻力完全发挥时的桩顶位移值为 $(0.005 \sim 0.02) D$, 远小于桩端阻力完全发挥时所需的位移值 $(0.05 \sim 0.10) D_b$ (D_b 为桩身直径), 且一般将桩顶位移为 $0.10D$ 时所对应的桩顶荷载作为桩基的极限承载力. 本次试验中, 当抗压桩在桩顶荷载为 10 633 kN 时, 桩顶位移为 $0.046D$; 当桩顶荷载增加到 11 600 kN 时, 桩端发生刺入破坏, 桩顶位移值突然增加到 $0.118D$, 说明根植桩桩端阻力完全发挥时所需的位移值与传统桩基的桩端阻力完全发挥时所需的位移值十分接近. 从图 6 中还可以看到, 当抗压桩的桩顶位移为 $0.029D$ 时, 其桩顶荷载与计算极限侧摩阻力的比值为 1.10, 与试桩实测桩侧摩阻力与规范推荐值计算所得的桩侧摩阻力的比值 1.13 十分接近, 可以认为此时侧摩阻力已经完全发挥, 且基本不存在桩端阻力.

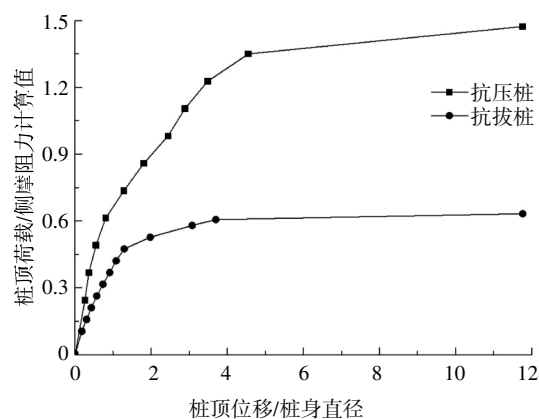


图 6 试桩侧阻发挥曲线

Fig.6 Development of skin frictions of test piles

通过对静钻根植抗压桩和抗拔桩的现场静载试验数据的分析可以发现, 抗压桩和抗拔桩侧摩阻力完全发挥时的桩顶位移值分别为 $0.029D$ 和 $0.037D$, 大于传统桩基侧摩阻力完全发挥时所需的桩顶位移值 $((0.005 \sim 0.020) D)$. 静钻根植抗压桩的现场静载试验结果显示不同土层中桩侧摩阻力完全发挥所需要的位移值为 $(0.018 \sim 0.033) D$ ^[10], 与本文的试验结果十分接近, 可以认为抗压桩和抗拔桩侧摩阻力完全发挥时的桩顶位移值比较合理; 抗压桩桩端阻力完全发挥时所需的桩顶位移与传统桩基桩端阻力完

