

文章编号: 1000-7598 (2012) 02-0343-06

高临界循环荷载水平下钻孔桩的抗拔性状分析

张忠苗¹, 谢志专¹, 赵玉勃¹, 李慧明²

(1. 浙江大学 岩土工程研究所 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405)

摘 要: 为了研究抗拔桩在循环加载过程中桩身的性状, 选取杭州萧山某工地两根抗拔桩作为试桩进行循环加载试验。在抗拔桩桩身埋设钢筋应力计, 测量循环加载过程中桩身应力的变化情况; 在桩身预埋钢管, 测量桩顶及桩端上拔量。通过对桩身应力及桩顶、桩端上拔量的分析, 研究循环加载对抗拔桩承载力及上拔量的影响。综合分析抗拔桩承受循环荷载时的桩顶、桩端上拔量、桩身轴力以及桩侧摩阻力分布可知, 当抗拔桩承受循环荷载时, 且临界循环荷载水平较大 (接近或者达到 1), 抗拔桩经过 2~3 次循环加载后就发生破坏, 其研究结果可供其他类似工程参考。

关 键 词: 抗拔桩; 循环加载; 桩侧摩阻力; 桩身应力;

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Uplift behaviors of bored piles subjected to high critical cyclic loading level

ZHANG Zhong-miao¹, XIE Zhi-zhuan¹, ZHAO Yu-bo¹, LI Hui-ming²

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironment Engineering, Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Earthquake Engineering Research Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In order to study the behaviors of uplift pile subject to cyclic load, cyclic loading tests are carried out on two uplift piles at Xiaoshan, Hangzhou. Stress gauges and steel pipes are pre-buried in the test pile to measure the changes of pile shaft stress and the pull-out amount of both pile tip and pile head. Through the analysis of the pile shaft stress and the pull-out amount, the influence of cyclic load on bearing capacity and pull-out amount are studied. Comprehensive analysis of the pull-out amount, pile shaft force and pile side friction, it is drawn a conclusion that the uplift pile damaged after two or three cycles when uplift pile subjects to cyclic load, and the critical cyclic load level is close to 1.

Key words: uplift pile; cyclic loading; pile side friction; pile shaft stress

1 引 言

随着越来越多的高耸和轻巧建筑物的出现, 抗拔桩基础的使用也日趋广泛。每到夏季, 这些建筑物都要经受热带风暴的考验, 而这些建筑物抵抗风暴袭击主要是依靠抗拔桩, 这时的抗拔桩承受的荷载形式为循环荷载, 某些时候抗拔桩所承受的荷载可能接近或达到抗拔桩的极限荷载, 因此, 研究抗拔桩承受循环荷载 (当循环荷载中的荷载水平较高时) 非常有必要的。目前人们对抗拔桩的研究比较粗浅, 主要集中在研究抗拔桩的极限承载力方面^[1-10], 对抗拔桩承受循环荷载作用方面的研究很少, 且大多局限于理论和模型试验, 大型的现场试验很少。本文选取杭州萧山某工地抗拔试验桩作为研究对

象, 分析抗拔桩承受循环荷载作用时的受力性状, 得出一些规律, 以供其他类似工程参考。

2 循环荷载对抗拔桩性状的影响

桩基础在循环荷载作用下的性能会有所下降, 称为循环荷载效应。国内外一些学者研究了循环荷载对对桩基础的影响^[11-15]。循环荷载效应主要体现在:

(1) 承载力减损。循环荷载对承载力的影响, 包括抗压和抗拔承载力, 在循环荷载作用后, 将比没有循环荷载作用时要小。

(2) 位移累计。循环荷载导致的桩基位移累计, 随着荷载循环次数增大, 保持荷载水平不变, 桩基位移可能会越来越大。

收稿日期: 2010-05-19

第一作者简介: 张忠苗, 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事基础工程方面的研究、教学与检测工作。E-mail: zjuzzm@163.com

(3) 刚度退化。循环荷载对桩基刚度的影响, 荷载循环导致桩基的刚度降低。

临界循环荷载水平一般定义为循环荷载的最大荷载 $P_{\max}$ 与桩基静态极限承载力 P_u 的比值, 即:

$$P_{cr} = \frac{P_{\max}}{P_u} \quad (1)$$

对于特定循环荷载作用模式, 存在一个临界循环荷载水平 P_{cr} , 即在这个循环荷载水平以下, 桩基性能受到荷载循环影响, 但随着荷载循环的增加, 桩基系统可以保持稳定, 不发生承载力破坏, 也不会发生过大的位移; 在此临界循环荷载水平以上, 桩基性能随着荷载循环的增加退化显著, 在一定荷载循环时发生承载力破坏, 或者累计位移过大。

对于循环荷载影响桩基性状的机制, 国内外学者给出了多种解释。Grosh^[12]通过模型试验分析, 认为循环荷载作用下桩-土间变化的侧摩阻力下降的原因是土体中粒间黏结的破坏和土颗粒在荷载作用方向的重新排列。Poulos^[13]认为, 主要存在两种侧摩阻力减损机制, 一是循环减损; 二是应变软化。如果循环荷载强度 P_c 较大, 循环减损为主要因素, 如果平均荷载大, 应变软化成为主要因素。Poulos^[14]总结桩基在环荷载作用下侧摩阻力下降的原因为, 桩周土体的体积应变减少了桩-土界面上的水平应力。McManus^[15]等认为, 侧摩阻力循环减损的原因

之一是荷载循环使桩周土体的体积变小、孔隙水压力增大, 从而使桩-土界面的水平应力降低。

经过国内外专家学者的研究可以认为, 导致侧摩阻力循环减损的可能因素主要有: 桩周土体的剪缩、孔隙水压力增大、桩-土界面的水平应力降低以及土颗粒在荷载作用方向的重新排列减少了侧摩阻力。

3 场地地质和试桩概况

本试验选取杭州萧山某工地两根抗拔桩 S1 和 S2 作为试桩, 试桩为钻孔灌注桩, 桩径 $\phi 800$ mm, 桩身采用 C35 混凝土, 持力层为卵石层, 设计要求单桩竖向抗拔承载力极限值为 4 000 kN, 本工地其他类似抗拔桩静载试验结果表明, 该类型试桩极限承载力为 4 000 kN, 故认为 S1 和 S2 试桩极限承载力为 4 000 kN。试桩相关参数见表 1, 土层物理力学性质指标见表 2, 其中, h 为各土层厚度, w 为天然的水质量分数, γ 为重度, I_p 为塑性指数, I_L 为液性指数, E_s 为压缩模量 c 为黏聚力, ϕ 为内摩擦角, f_k 为地基承载力特征值, q_{sa} 为单位桩侧摩阻力特征值, q_{pa} 为单位桩端摩阻力特征值。为了获得桩身应力-应变关系, 在 S1 桩身 8 个断面埋设了钢筋应力计, 每个断面 3 个, 应力计焊接在钢筋笼上面; 安装的位置根据场地土层的分层情况和桩长而定。

表 1 试桩基本资料

Table 1 Basic parameters of test piles

桩号	桩长 / m	桩径 / mm	打桩灌注日期 / 年-月-日	试验日期 / 年-月-日	桩身混凝土强度等级	入持力层深度 / m	充盈系数	配筋
S1	37.11	800	2010-01-03	2010-03-11	C35	2	1.20	上 30 mm ϕ 25mm,
S2	40.20	800	2010-01-03	2010-03-12	C35	2	1.14	下 15 mm ϕ 25 mm

表 2 典型土层的物理力学性质指标

Table 2 The indices of physico-mechanical properties of typical soil layers

层次	土层名称	h / m	ω / %	γ / (kN/m ³)	I_p / %	I_L / %	E_s / MPa	c / kPa	Φ / (°)	f_k / kPa	q_{sa} / kPa	q_{pa} / kPa
0-1	杂填土	0	25.9	16.2			7.91			50		
0-2	素填土	0.7	26.9	18.8	8.6	0.94	10.81	13.7	30.2	50		
1-1	黏质粉土	1.8	28.3	18.5	8.9	1.05	10.78	14.8	28.7	120	14	
1-2	砂质粉土	4.3	28.0	18.6	9.2	1.09	11.78	12.6	30.1	140	22	
2-1	砂质粉土	6.5	26.8	18.8	10.1	1.11	11.8	13.5	29.2	150	23	
2-2	砂质粉土	8.4	25.5	18.8	9.3	1.07	10.88	11.1	30.4	130	19	
3-1	粉砂夹粉土	15.4	24.8	19.1	10.0	1.01	11.33	9.6	30.4	160	25	
3-2	黏质粉土	18.3	29.4	18.6	9.8	1.13	8.37	15.9	24.3	110	15	
4-1	粉质黏土	25.1	27.3	18.8	14.8	0.45	6.49	60.3	15.2	180	27	
5-1	含砂粉质黏土	27.1	22.5	19.5	10.3	0.51	7.06	31.4	22.5	240	34	
6-1	圆砾	31.1								400	40	2 000
6-2	卵石	36.6								550	55	2 500
6-3	粉细砂	47.3	23.2	19.3						250	38	
6-4	卵石	54.3								580	60	2 700

建筑物遭受风暴袭击时, 抗拔桩承受的荷载可能接近或者达到其极限承载力, Poulos^[14]通过模型试验得出不同临界循环荷载水平时, 桩顶沉降与循环次数的关系图(如图1所示), 从图中可以看出, 当临界循环荷载水平为0.36时, 经过5次循环, 桩体因位移过大而破坏。本试验临界循环荷载水平为1, 为了不使桩体破坏, 故循环次数选为3。

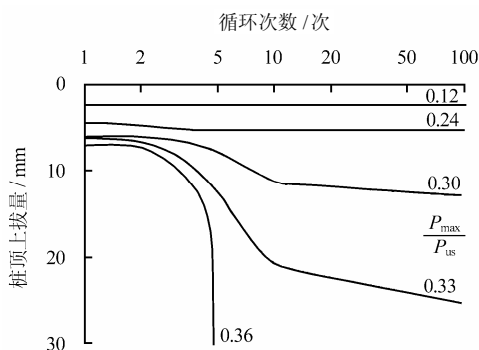


图1 桩顶上拔量与循环次数关系图^[15]

Fig.1 Relation curves of displacement versus number of cycles

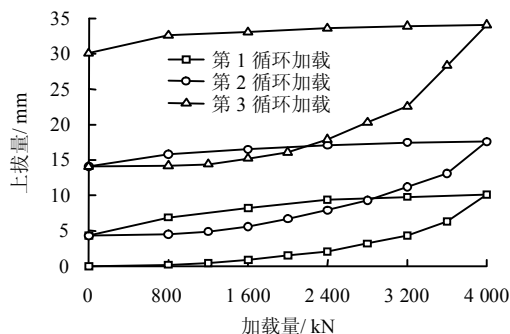
4 抗拔桩循环加载试验分析

本抗拔桩循环加载试验采用支墩-反力架装置, 加载方法采用千斤顶反力分级加载, 并用JCQ静载自动记录仪自动记录每级压力。加载、卸载方式按相关的规范进行。桩顶, 桩端上拔量用千分表测量得到, 并用频率仪记录每一次加载后钢筋应力计的频率。

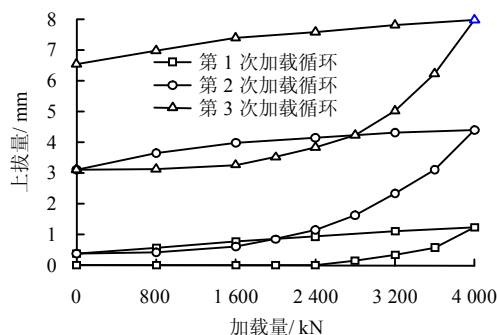
4.1 桩顶及桩端上拔量分析

循环荷载作用下抗拔桩的 $U-\delta$ 结果见图2。从图2可以看出, 抗拔桩承受循环荷载时, 每一次加载、卸载循环, $U-\delta$ 曲线规律都大致相同: 加载过程中, 当加载量增加时, 桩身上拔量增加; 卸载时, 随着荷载减少, 上拔量缓慢回弹。进一步分析每一次加载循环时的最大桩顶、桩端上拔量(见表3)可以发现, 对于桩顶上拔量, 随着循环加载次数的增加, 每次加载循环的桩顶最大上拔量都有所增加, 且第2次加载循环时的桩顶上拔量较第1次加载循环的桩顶上拔量增加尤为明显; 对于桩端上拔量, 每次加载循环时, 最大桩端上拔量也呈递增趋势, 第2循环的最大桩端上拔量较第1循环的最大桩端上拔量增幅也非常明显。进行一步分析桩顶和桩端回弹率, 可以发现, S1和S2循环加载过程中, 第1循环过程中桩顶和桩端回弹率都比较大, 而第2、3循环回弹率却相对较小。造成这种现象出现主要有两方面的原因: 一方面是第1次循环过程中桩周

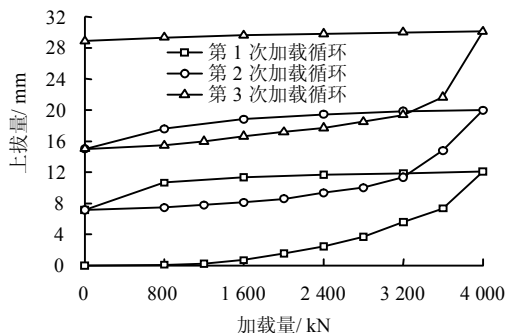
土体在加载、卸载过程中只是部分屈服, 而到第2、3循环加载时, 桩周土体由于反复剪切而屈服, 出现应力软化, 故加载过程中桩身被一定程度的拔起, 因此, 回弹率较小; 另一方面是第1次加载过程中



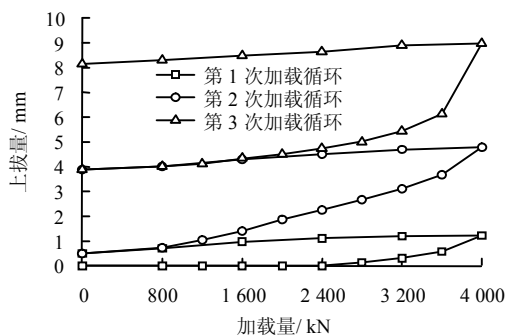
(a) S1 桩顶 $U-\delta$ 曲线



(b) S1 桩端 $U-\delta$ 曲线



(c) S2 桩顶 $U-\delta$ 曲线



(d) S2 桩端 $U-\delta$ 曲线

图2 试桩荷载 U -上拔量 δ 曲线图

Fig.2 Load-uplift displacement curves of test piles

表3 试桩的荷载 U 与上拔量 δ 的主要结果
Table 3 Main results of load-uplift displacement of test piles

桩号	最大加载 / kN	位移 / mm		残余变形 / mm		回弹率 / %	
		桩顶	桩端	桩顶	桩端	桩顶	桩端
S1(第1循环)	4 000	10.10	1.23	4.30	0.37	57.4	69.9
S1(第2循环)	4 000	13.30	4.03	9.80	2.74	26.3	27.2
S1(第3循环)	4 000	20.10	4.70	15.10	3.43	24.9	27.0
S2(第1循环)	4 000	12.11	1.22	7.15	0.49	40.9	59.8
S2(第2循环)	4 000	12.83	4.29	7.87	3.39	38.7	20.9
S2(第3循环)	4 000	15.02	5.08	13.87	4.27	7.6	15.9

桩身混凝土比较完好, 没有出现裂缝, 桩顶和桩端上拔量大部分表现为桩身的弹性变形, 卸载后桩身恢复原样, 故第1次加载循环完成后, 桩顶桩端回弹率较大, 而第2、3次循环加载过程中, 桩身混凝土由于反复拉压而出现裂缝, 且随着循环加载次数的增加而裂缝逐步变大, 因此, 第2、3循环过程中桩顶、桩端上拔量部分表现为桩身混凝土裂缝宽度, 而这种裂缝已经出现就不会消失, 因此, 2、3循环过程中桩顶、桩端上拔量回弹率较小。

后来, 通过超声波和取芯检测发现 S1 试桩 2 m 处和 S2 试桩 20 m 处出现裂缝, 进一步验证了这一解释。其中 S1 试桩 2 m 处出现裂缝可能是因为混凝土浇筑过程中出现部分离析导致的; 而 S2 试桩 20 m 处正好位于桩身配筋由 30 根变为 15 根的交界部位, 该处出现裂缝可能是因为钢筋锐减, 混凝土受力不均引起的。

4.2 桩身轴力分析

为了研究抗拔桩循环加载过程中桩身的应力-应变关系, 本试验在 S1 桩身钢筋笼上焊接了 24 个钢筋应力计, 分别焊接在 8 个断面上, 每个断面焊接 3 个钢筋应力计。根据钢筋应力计的实测读数, 可以计算各断面桩身轴力^[16-17], 由式(2)计算得到某一级荷载作用下 i 断面钢筋轴力 P_{si} :

$$P_{si} = K(F_i^2 - F_0^2) + B \quad (2)$$

式中: K 为标定系数 (kN/Hz^2); F_i 为某一级荷载作用 i 断面钢弦振动频率 (Hz); F_0 为钢弦初始振动频率 (Hz); B 为计算修正值 (kN), 由仪器标定书提供。得到 i 断面钢筋轴力后, 由式(3)计算该断面钢筋应变 ε_i :

$$\varepsilon_i = \frac{P_{si}}{E_s A_s} \quad (3)$$

式中: A_s 为钢筋面积 (m^2); E_s 为钢筋弹性模量 (kPa)。

钢筋和混凝土浇灌在一起, 假定两者变形一致, 即任一断面钢筋和混凝土具有相同的应变值。

在桩身混凝土应力 σ_{ci} 为

$$\sigma_{ci} = E_c \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: E_c 为混凝土的弹性模量

桩身轴力:

$$Q_i = A_{ci} \sigma_{ci} + n P_{si} \quad (5)$$

式中: A_{ci} 为桩身截面混凝土面积。 n 为灌注桩某一个截面钢筋的根数。

由上述方法计算得出各级荷载作用下桩身轴力分布见图3。

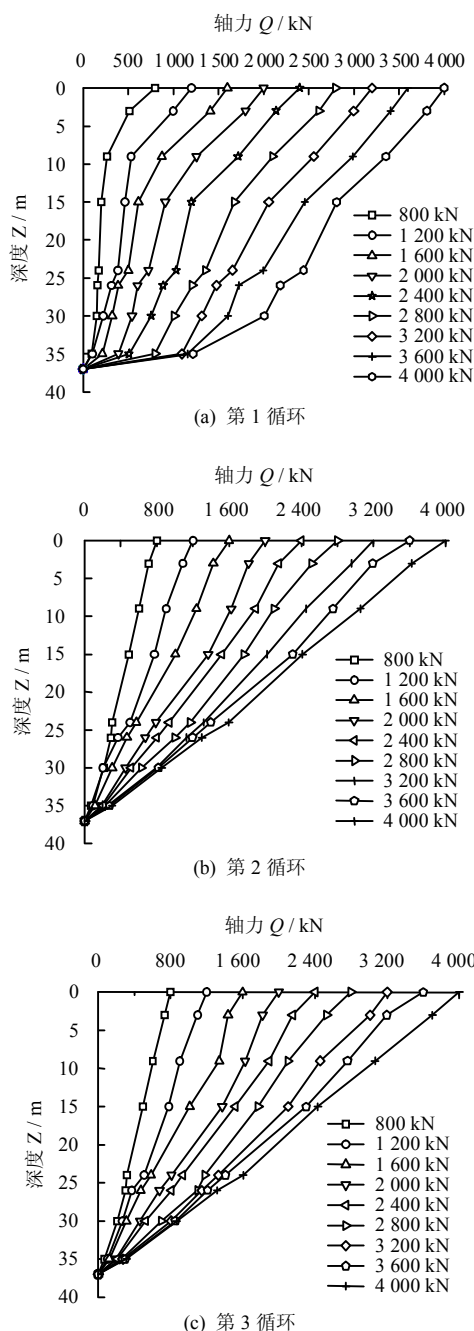


图3 试桩各级荷载作用下桩身轴力

Fig.3 Axial forces of test piles under different loads

由图3可以看出,第1循环加载过程中,桩身0~9 m轴力减小较快,中间部分桩身轴力减小较慢,桩身下部接近桩端部分轴力减小再次变快。这主要是由于0~9 m桩周土为砂土,侧摩阻力较高,而9~26 m桩周土层为粉土和黏土,侧摩阻力较低。再往下土层为圆砾和卵石,强度比粉土和黏土高,则轴力减小又再次变快。从图3还可以看出,桩顶荷载是逐渐地从上向下传递的,砂土段承担了相当大的摩阻力。

对比3次加载过程桩身轴力的分布可以发现,第1循环加载过程中桩身轴力的分布与第2、3循环加载过程的桩身轴力分布有较大变化,而第2、3循环加载过程时的桩身轴力分布较为相似。第1循环加载过程中桩身轴力大致呈“S”型,而第2、3循环桩身轴力呈均匀递减趋势,这是因为第1循环加载过程时,桩周土体只是部分屈服,整根桩仍然处于正常使用范围,而经过一个反复剪切以后,桩周土体大部分达到屈服,桩侧土体出现软化现象,桩身轴力出现重分布,呈现均匀递减趋势,这一结论在后面的平均桩侧摩阻力研究中得到验证。

4.3 平均桩侧摩阻力

由前面计算出来的各断面桩身轴力,可以计算出桩侧平均摩阻力^[16-17]。

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{A_i} \quad (6)$$

式中: Q_i 、 Q_{i+1} 为第 i 、 $i+1$ 断面轴力; A_i 为第 i 分层桩侧表面积。

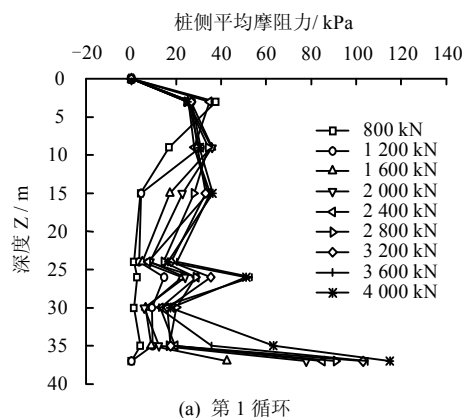
本试验各级荷载下平均桩侧摩阻力见图4。

桩侧摩阻力的大小与桩土之间的相对位移、刚度比、作用在桩侧表面的水平应力以及土的特性有关。由图4(a)可以看出,粉土和黏土的桩侧摩阻力相对较小,较大的桩侧摩阻力主要集中在桩的上半段砂土段中;到了中下半段的粉土和黏土段时,桩侧摩阻力显著下降;靠近持力层附近较好的土质时,桩侧摩阻力又显著增加。

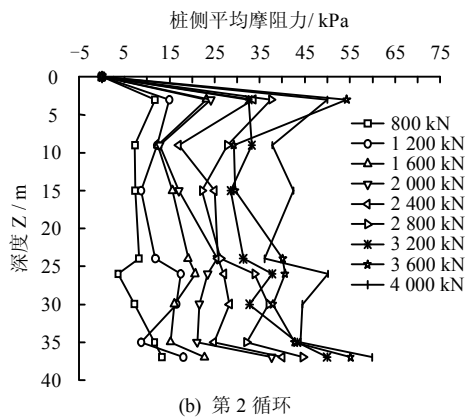
进一步由图4(a)可以知,第1循环加载过程时,上部土层和下部土层摩阻力的发挥是一个异步的过程,上部土层的摩阻力先于下部土层发挥作用。随着荷载增大,上部土层的摩阻力逐渐趋于稳定,而下部土层的摩阻力还远未发挥完全。不同的土层中,桩侧平均摩阻力有所差别。在同一土层中,随着荷载的增加,平均桩侧摩阻力也相应的增大,但增加的幅度有所差别。桩顶上拔荷载较小时,桩端处的平均侧摩阻力为0,当桩顶荷载较大时,桩端处的平均侧摩阻力比较大。当桩顶荷载达到2 800 kN时,

可以明显地看出桩侧摩阻力出现了应力软化现象。

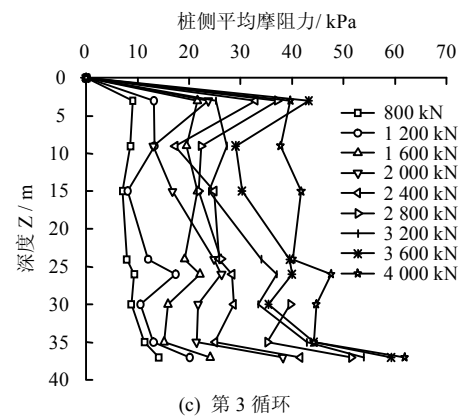
对比3个循环加载过程的平均桩侧摩阻力可以发现,第1循环加载过程中不同深度的侧摩阻力差别很大,而第2、3循环加载过程中沿桩身侧摩阻力分布比较均匀,这是因为第2、3循环加载过程中,由于反复加载、卸载,桩周土体经过多次反复剪切而破坏,部分出现软化,使得桩周土体侧摩阻力重新分布,其沿桩身分布比较均匀。对比第2循环与第3循环可以看出,第3循环与第2循环相比,部分侧面进一步出现了应力软化。



(a) 第1循环



(b) 第2循环



(c) 第3循环

图4 试桩各级荷载下各断面平均桩侧摩阻力值
Fig.4 Side resistances of test piles under different loads

5 结 论

(1) 抗拔桩承受循环荷载时, 随着循环次数的增加, 桩顶和桩端上拔量都逐步增加, 且第 2 循环较第 1 循环增加尤为明显。第 1 循环过程中桩顶桩端回弹率较大, 而第 2、3 循环过程中桩顶桩端回弹率较小。

(2) 抗拔桩承受循环荷载时, 桩身轴力随深度增加而减少。第 1 循环加载过程中, 0~9 m 轴力减小较快, 中间部分桩身轴力减小较慢, 桩身下部接近桩端部分轴力减小再次变快。第 2、3 循环加载过程中, 桩身轴力呈均匀递减。

(3) 抗拔桩承受循环荷载时, 上部土层和下部土层侧摩阻力异步发挥, 上部土层的摩阻力先于下部土层发挥作用, 桩顶上拔荷载较小时, 桩端处的平均侧摩阻力为 0, 当桩顶荷载较大时, 桩端处的平均侧摩阻力比较大。第 2、3 循环加载过程中, 桩身侧摩阻力分布较为均匀。

(4) 综合分析抗拔桩承受循环荷载时的桩顶、桩端上拔量、桩身轴力以及桩侧摩阻力分布可知, 当抗拔桩承受循环荷载时, 且临界循环荷载水平较大(接近或者达到 1), 抗拔桩经过 2~3 次循环加载后就发生破坏, 因此, 建议经常遭受风暴袭击的地区, 进行高耸、轻巧建筑物抗拔桩设计时, 应适当提高安全系数, 以确保建筑物安全。

参 考 文 献

- [1] DAS B M, JONES A D. Uplift capacity of rectangular foundations in sand[J]. **Transportation Research Record**, 1982, 884: 54—58.
- [2] TAGAYA K, SCOTT R F, ABOSHI H P. Resistance of buried anchor in sand[J]. **Soils and Foundations**, 1988, 28(3): 114—130.
- [3] STEWART W. Uplift capacity of circular plate anchors in layered soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1985, 22: 589—592.
- [4] DICKIN E A, LEUNG C F. Performance of piles with enlarged bases subject to uplift forces[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, 27: 546—556.
- [5] DICKIN E A, LEUNG C F. The influence of foundation geometry on the uplift behaviour of piles with enlarged bases in sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1992, 29(3): 498—505.
- [6] NEELY W J. Bearing capacity of auger-cast piles in sand[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**, 1991, 117(2): 567—571.
- [7] 杨龙才, 郭庆海, 周顺华, 等. 高速铁路桥桩在竖向循环荷载长期作用下的承载和变形特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(13): 2362—2368.
- [8] YANG Long-cai, GUO Qing-hai, ZHOU Shun-hua. Dynamic behaviors of pile foundation of high-speed railway bridge under long term cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2362—2368.
- [9] 张忠苗, 张乾青, 张广兴. 软土地区抗拔桩受力性状的实验研究[J]. **浙江大学学报**, 2009, 43(11): 2114—2119.
- [10] ZHANG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing, ZHANG Guang-xing. Mechanical properties of uplift pile in soft soils[J]. **Journal of Zhejiang University**, 2009, 43(11): 2114—2119.
- [11] 彭雄志, 赵善锐, 罗书学, 等. 高速铁路桥梁基础单桩动力模型试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2002, 24(2): 218—221.
- [12] PENG Xiong-zhi, ZHAO Shan-rui, LUO Shu-xue, et al. Dynamic model tests on pile foundation of high-speed railway bridge[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 218—221.
- [13] 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.
- [14] HE Si-ming. Study on bearing capacity and failure of uplift pile[J]. **Rock and Soil Mechanicals**, 2001, 22(3): 308—310.
- [15] 程波, 王唯华, 丁佩民. 考虑循环荷载反复作用的抗拔桩设计[J]. **工程建设与档案**, 2005, 19(3): 200—203.
- [16] GROSH I J, REESE L C. Field tests of small-pile segments in a soft clay deposit under repeated axial loading[C]//Pro. 12th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1980.
- [17] POULOS H G. Cyclic stability diagram for axially loaded piles[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**, 1988, 114(8): 877—895.
- [18] POULOS H G. Cyclic axial loading analysis of piles in sand[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**, 1989, 115(6): 836—854.
- [19] MCMANUS K J, KULHAWY F D. Cyclic axial loading of drained shafts in cohesive soil[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**, 1994, 120(9): 1481—1497.
- [20] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [21] 张忠苗, 俞君, 张广兴, 等. PHC 管桩和预制方桩受力性状试验对比分析[J]. **岩土力学**, 2008, 29(11): 3059—3064.
- [22] ZHANG Zhong-miao, YU Jun, ZHANG Guang-xing, et al. The contrastive experimental analysis for bearing behavior of PHC piles and precast square piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3059—3064.