

DOI: 10.11779/CJGE2015S2031

# 软土群桩原位足尺试验研究

戴国亮<sup>1, 2</sup>, 戴永兴<sup>3</sup>, 茅燕兵<sup>3</sup>, 龚维明<sup>1, 2</sup>, 李小娟<sup>1, 2</sup>

(1. 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210018; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210018;

3. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

**摘要:** 软土地区群桩基础受力机理复杂, 目前阶段国内外关于群桩的现场足尺试验比较缺乏。在南京市江宁区软土地基进行了9桩的钻孔灌注群桩的足尺试验, 试验桩桩径为400 mm, 桩长分为20, 24 m。通过布设在桩身各控制断面主筋上的钢筋计测量桩身轴力, 在群桩中不同基桩桩顶的压力盒测量桩顶荷载。对比分析了单桩和群桩的沉降特性、轴力特性、侧摩阻力特性以及群桩中各基桩的荷载分配规律, 并将实测的桩顶反力和群桩效应系数与理论方法计算所得结果进行了比较, 结果表明弹性理论计算所得的群桩中各基桩桩顶荷载差异比实测值大; 考虑应力叠加的群桩效应系数的公式以及Converse-Labre群桩效应公式与本次试验的实测数据比较吻合。

**关键词:** 群桩基础; 足尺试验; 现场试验; 侧摩阻力; 荷载分配; 群桩效应系数

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S2-0158-06

**作者简介:** 戴国亮(1975-), 湖南安化人, 东南大学教授, 科研方向: 桩基础及深基础。E-mail: daigl@seu.edu.cn。

## Full scale in-situ static loading tests on pile groups in soft soils

DAI Guo-liang<sup>1, 2</sup>, DAI Yong-xing<sup>3</sup>, MAO Yan-bing<sup>3</sup>, GONG Wei-ming<sup>1, 2</sup>, LI Xiao-juan<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory for RC and PC Structures of Ministry of Education, Nanjing 210018, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast

University, Nanjing 210018, China; 3. Design Institute of Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** The bearing characteristics of pile groups in soft soils are complex. At present there are few full scale tests on in-situ pile groups at domestic and abroad. Full scale tests on bored pile groups are conducted to explore the performance of pile groups in soft soils in Jiangning District of Nanjing City. The pile diameter is 400 mm, and the pile length is 20 and 24 m. The loading tests are carried out on a single pile and pile groups with nine piles. Steel bar meters are fixed in the piles to measure the axial force. Pressure cells are placed at the top of the piles to get the accurate load on them. The data of the tests are listed to show the comparison of settlement, axial force, side resistance and load distribution of the single pile and pile groups. The measured values of counterforce of pile head and the effect coefficient of pile groups are compared with those calculated by different kinds of theoretical methods. The results show that the load distribution calculated by the elastic theory in the pile groups has larger difference compared with the measured value. The results of the formula for pile group effect coefficient considering stress superposition and the Converse-Labre's formula for pile group effect coefficient agree well with the measured values.

**Key words:** pile group; full scale test; in-situ test; side resistance; load distribution; effect coefficient of pile group

## 0 引言

群桩基础的工作性能甚为复杂, 目前阶段主要还是通过现场的单桩荷载试验和室内模型试验来研究其承载能力及沉降理论。室内模型试验由于存在尺寸效应其结果并不能完全真实地反映实际的群桩工作性能。由于群桩效应的存在, 利用单桩荷载试验的结果推算群桩的承载力和沉降的理论并不完善。相比而言现场足尺试验能更可靠地研究群桩的工作性能, 但其消耗的人力、物力和财力更多。韩焯等<sup>[1]</sup>曾在北京西郊进行了单桩、圆形承台的3桩和6桩群桩的现场足

尺试验, 得到较多全面可靠的试验数据。Bai<sup>[2]</sup>为研究承台-群桩-土相互作用而进行过两组4桩群桩的足尺试验, 试验结果表明由于承台的作用群桩效应系数大于1。O'Neill<sup>[3]</sup>等为了研究打入桩在打入的过程和打入后的一段时间内桩及桩周土的反应对群桩承载性能的影响而在饱和的超固结黏土中进行了一项单桩与9桩钢管群桩的足尺试验, 试验发现群桩与单桩周围土

基金项目: “973”计划资助项目(2013CB036304)

收稿日期: 2015-03-26

的孔隙水压消散率相一致。Phung<sup>[4]</sup>为研究减沉疏桩基础桩-承台-土的相互作用而进行多组单桩与群桩现场足尺试验, 试验表明承台的作用随着侧摩阻力增大而增大的趋势。刘金砺<sup>[5]</sup>等曾在济南市洛口小鲁庄黄河南岸进行了不同桩径、桩长和不同排列形式的高低承台的钻孔单桩与群桩的现场试验, 试验中桩身均位于距离地表 8 m 深范围内的均匀粉土层中, 获得了许多具有实际工程意义的研究成果。然而国内外进行的群桩足尺试验并不多见, 尤其是长径比大于 50 的群桩基础试验。为了研究软土地区大长径比的群桩承载性能, 本文在南京江宁区进行了桩长分别为 20, 24 m(长径比为 50 和 60) 的钻孔灌注桩的单桩与正方形分布的 9 桩群桩的现场足尺试验, 对比分析了群桩中各基桩和单桩的端阻力与侧摩阻力分布规律、沉降特性以及群桩桩顶反力分配规律。

1 试验简介

1.1 试验概况

为了对比不同长径比和不同桩间距的群桩承载性能, 试验中设计了 20 m(QZ9 和 DZ1) 和 24 m(QZL9 和 DZL1) 两种桩长(考虑长径比为 50 和 60)、2.5 和 3 倍桩径的两种桩距和桩径均为 400 mm 的方案进行对比, 也进行了同样参数的单桩静载荷试验。试验中承台和桩身的混凝土强度等级都为 C25, 实测混凝土弹性模量 29.2 GPa, 施工采用正循环回旋钻进; 桩身保护层 35 mm, 主筋配置为 3 根沿圆周均匀布置的 HRB335 钢筋, 箍筋为  $\phi 6.5@400$  mm, 同时沿桩长配置了  $\phi 16@2000$  mm 的加强箍筋; 桩与承台刚性连接, 单桩承台尺寸为(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 0.4 m $\times$ 0.4 m $\times$ 0.4 m; 群桩承台尺寸为分别为(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 2.8 m $\times$ 2.8 m $\times$ 1.2 m 和 3.2 m $\times$ 3.2 m $\times$ 1.2 m。其中, 桩位布置和桩号见图 1。

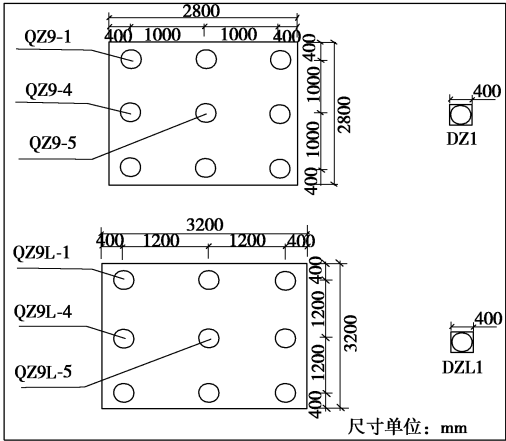


图 1 桩位布置图

Fig. 1 Layout of piles and pile groups

1.2 试验方法

此次试验采用慢速维持荷载法进行。试验中电子位移传感器量测桩顶和承台顶部向下的位移, 承台顶部 4 角各布置一个电子位移传感器, 如图 2 所示。同时采用钢筋传感器量测桩身不同深度处的应变。对于 20 m 长的桩, 分别在其桩顶以下 0.5, 2.6, 4.6, 10.2, 17.5, 19.5 m 处安装钢筋传感器; 对于 24 m 长的桩, 分别在其桩顶以下 0.5, 2.6, 4.6, 10.2, 17.5, 23.5 m 处安装钢筋传感器。同时在群桩 1 号、4 号和 5 号桩(编号如图 1 所示)的桩顶安装了压力传感器。根据地质勘察土层资料以及文献[6]估算了单桩承载力为 1600 kN(20 m 桩长)和 1800 kN(24 m 桩长), 群桩预估堆载配重为 20000 kN。单桩分级荷载为 140 kN, 群桩分级荷载为 720 kN。桩侧摩阻力是基于钢筋计的实测数据, 计算截面应变, 从而获得轴力计算求得。桩端阻力是取用距桩底的最后一层的钢筋计截面轴力。

1.3 场地地质条件

试验场地主要土层分布如下:

第 1 层为素填土: 灰黄色, 主要由粉质黏土组成, 结构松散, 欠均质, 处于欠固结状态。第 2 层为黏土: 灰黄色, 硬—可塑, 夹粉质黏土, 切面光滑, 干强度高, 韧性高。第 3 层为粉土: 灰黄色, 湿, 中密, 韧性、干强度低, 摇振反应中等, 夹粉砂, 具水平层理。第 4 层为粉土夹粉砂: 灰色—青灰色, 湿, 中密, 韧性、干强度低, 摇振反应中等—迅速, 具水平层理, 局部夹薄层粉质黏土。第 5 层为粉质黏土: 灰色—青灰色, 软塑, 局部流塑, 偶夹粉土, 切面光滑, 干强度、韧性中等。

图 2 为试验场地中各土层主要物理参数以及钢筋计的位置。其中  $\gamma$  为土的重度,  $e$  为孔隙比,  $c$ 、 $\phi$  为土的抗剪强度指标,  $E_s$  为土的压缩模量,  $f$  为地勘报告提供的由静力触探法确定的桩侧摩阻力。最底层粉质黏土层底标高为 29.1 m, 由于试验场面积较小, 且土层较均匀, 该孔可以代表整个场地的地质情况。



图 2 地质条件及钢筋计布置图

Fig. 2 Geological conditions and layout of strain gauges

2 试验结果分析

2.1 单桩试验数据分析

将桩 DZ1（20 m 长单桩）和桩 DZ1L（24 m 长单桩）加载阶段的  $Q-s$  曲线绘制于同一坐标系，如图 3 所示。从图 3 可以看出桩 DZ1、DZ1L 极限承载力为 1433，1540 kN。在桩顶荷载小于 980 kN 时两桩  $Q-s$  曲线差别不大。

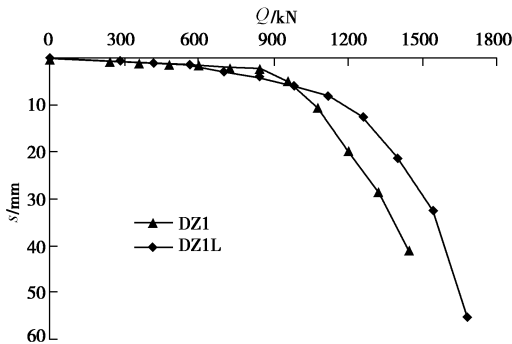


图 3 桩 DZ1、DZ1L 的  $Q-s$  曲线对比

Fig. 3 Comparison of  $Q-s$  curves between pile DZ1 and pile DZ1L

当桩顶荷载大于 980 kN 时两桩  $Q-s$  曲线差异明显，相同荷载作用下 DZ1 对应的桩顶沉降明显大于 DZ1L。

表 1 和表 2 分别列出了在最后一级荷载作用下各土层的侧摩阻力。从表 1~2 可以看出，在桩顶至 4.6 m 深范围内桩 DZ1L 的侧摩阻力大于桩 DZ1 的侧摩阻力，在 4.6 m 以下范围内的则相反。说明在极限荷载作用下，桩越长，桩身上段范围内土层的侧摩阻力发挥越充分，而桩身下段范围内土层的侧摩阻力则相对较难充分发挥。

表 1 DZ1 桩侧土层极限摩阻力

Table 1 Ultimate shaft resistances of DZ1 at each soil layer

土层深度/m	0.0~0.5	0.5~2.6	2.6~4.6	4.6~10.2	10.2~17.5	17.5~19.5
土层名	素填土	素填土	黏土	粉土	粉土夹粉砂	粉质黏土
侧摩阻力/kPa	31.87	29.60	86.58	64.82	62.49	25.53

表 2 DZ1L 桩侧土层极限摩阻力

Table 2 Ultimate shaft resistance of DZ1L at each soil layer

土层深度/m	0.0~0.5	0.5~2.6	2.6~4.6	4.6~10.2	10.2~17.5	17.5~19.5
土层名	素填土	素填土	黏土	粉土	粉土夹粉砂	粉质黏土
侧摩阻力/kPa	32.64	32.12	89.06	62.05	59.20	22.39

2.2 群桩试验数据分析

(1) 群桩沉降比较

图 4 将 2 组群桩加载阶段的  $Q-s$  曲线绘制于同一坐标系中。从图 4 可以看出桩长为 24 m 的群桩（QZ9L）沉降小于桩长为 20 m 的群桩（QZ9），这除了与桩长的差别有关外，也受桩间距差别的影响。群桩 QZ9 和群桩 QZ9L 极限承载力分别为 9126、10080 kN。

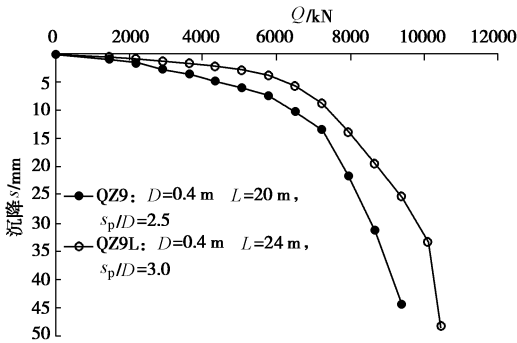


图 4 群桩  $Q-s$  曲线对比

Fig. 4 Comparison of  $Q-s$  curves of pile groups

(2) 承台效应分析

表 3、表 4 列出了本试验中由桩顶压力盒推算出的各级荷载下群桩中由基桩所承担的荷载占总荷载的比例。

表 3 群桩 QZ9 中由基桩承担的荷载之和占总荷载的比例

Table 3 Proportion of load carried by all foundation piles in QZ9

总荷载/kN	1440	2160	2880	3600	4320	5060
基桩承担比例/%	98	103	99	101	99	98
总荷载/kN	5760	6480	7200	7920	8640	9360
基桩承担比例/%	99	100	98	99	100	93

表 4 群桩 QZ9L 中由基桩承担的荷载之和占总荷载的比例

Table 4 Proportion of load carried by all foundation piles in QZ9L

总荷载/kN	1440	2160	2880	3600	4320	5060	5760
基桩承担比例/%	98	102	100	106	100	99	99
总荷载/kN	6480	7200	7920	8640	9360	10080	
基桩承担比例/%	99	97	101	99	102	108	

从表 3 和表 4 可以看出两组群桩中总荷载几乎全部由基桩承担，由承台承担的荷载接近于零。其原因是承台下土体为松散素填土，所能承担的荷载很小。值得注意的是，表中部分数据显示在某些荷载等级下基桩承担的荷载之和大于总荷载，其原因可能是堆载过程中存在一些偶然因素导致少量的荷载偏心，而基桩承担的荷载之和是由 4 倍角桩承担的荷载加上 4 倍边桩承担的荷载以及加上中桩承担荷载计算而得到的，计算中假定 4 根边桩承受的荷载是一样的，4 根的角桩承受的荷载是一样的，这样导致在某些荷载等级下基桩承担的荷载之和大于总荷载。由计算所得数

据可以推测出偶然偏心偏向装有压力盒的基桩一侧。

为进一步证明本次试验中承台底的松散素填土承担的荷载接近于 0，利用 Schmertmann 方法<sup>[6]</sup>反算承台底的反力。其结果如表 5，表 6 所示。

表 5 群桩 QZ9 中各级荷载下反算出的承台底反力

QZ9		
总荷载/kN	承台反力/kPa	承台承担荷载比/%
1440	0	0
2160	0.62	0.22
2880	1.06	0.29
3600	1.43	0.31
4320	1.92	0.35
5040	2.46	0.38
5760	3.00	0.41
6480	4.19	0.51
7200	5.46	0.59
7920	8.83	0.87
8640	12.80	1.16
9360	18.21	1.53

表 6 群桩 QZ9L 中各级荷载下反算出的承台底反力

QZ9L		
总荷载/kN	承台反力/kPa	承台承担荷载比/%
1440	0.21	0.15
2160	0.36	0.17
2880	0.54	0.19
3600	0.74	0.21
4320	0.98	0.23
5040	1.27	0.26
5760	1.65	0.29
6480	2.60	0.41
7200	4.00	0.56
7920	6.32	0.81
8640	8.88	1.05
9360	11.56	1.26
10080	15.30	1.55

从表 5~6 可以看出随着总荷载增大,两组群桩的承台承担的荷载比例也在增大,但最大未能超过

1.60%，由此可见本次试验中的承台承担的荷载并不明显。

Schmertmann 方法是用来计算浅基础沉降的方法。计算时忽略了桩的作用，将承台看作浅基础，由其实测沉降反算承台底反力。由于桩的存在，承台实际承担的荷载小于以上方法计算所得结果。

表 7 列出了在最后一级荷载作用下 QZ9 和 QZ9L 中各基桩的端阻力。从表 7 可以看出两组群桩中基桩的端阻力都是中桩>边桩>角桩。这是由于群桩中相邻桩对桩端土具有约束作用，这种作用对中桩最为显著，角桩最小。

表 7 群桩中各基桩桩端阻力

Table 7 Tip resistances of each foundation pile on pile groups			
基桩编号	QZ9-1	QZ9-4	QZ9-5
桩端阻力/kN	22	40	86
基桩编号	QZ9L-1	QZ9L-4	QZ9L-5
桩端阻力/kN	45	62	77

分析可知在最后一级荷载作用下 QZ9-1、QZ9-4、QZ9-5 的端阻力相对于 DZ1 的极限端阻力分别增加了 -30%、26.8%、170%，QZ9L-1、QZ9L-4、QZ9L-5 的端阻力相对于 DZL1 的极限端阻力分别增加了 -37%、0.65%、25%。可以看出边桩和中桩的极限端阻力较单桩的增大了，这是由于邻桩相互影响使得群桩中各基桩极限侧摩阻力较单桩而言有所下降，端阻力相应增大。

(3) 群桩中基桩桩身侧摩阻力特性分析

表 8 和表 9 列出了各基桩在最后一级荷载下各土层的侧摩阻力。各基桩的极限侧摩阻力比单桩的极限侧摩阻力有所降低。20 m 长桩型群桩中各土层极限侧摩阻力下降比例如下：素填土层约为 43%，黏土层约为 26%，粉土约为 30%，粉土夹粉砂为 39%，粉质黏土约为 33%。24 m 长桩型群桩中各土层极限侧摩阻力下降比例如下：素填土层约为 27%，黏土层约为 16%，粉土约为 23%，粉土夹粉砂为 28%，粉质黏土约为

表 8 群桩 QZ9 中各基桩侧土层极限摩阻力

Table 8 Ultimate shaft resistances of QZ9 at each soil layer							
土层深度/m		0.0~0.5	0.5~2.6	2.6~4.6	4.6~10.2	10.2~17.5	17.5~19.5
土层名		素填土	素填土	黏土	粉土	粉土夹粉砂	粉质黏土
摩阻力/kPa	QZ9-1	16.96	17.80	68.62	43.28	41.20	17.52
	QZ9-4	16.75	15.85	63.95	45.36	36.00	16.06
	QZ9-5	19.75	17.85	65.95	46.36	41.12	18.06

表 9 群桩 QZ9L 中各基桩侧土层极限摩阻力

Table 9 Ultimate shaft resistances of QZ9L at each soil layer							
土层深度/m		0.0~0.5	0.5~2.6	2.6~4.6	4.6~10.2	10.2~17.5	17.5~19.5
土层名		素填土	素填土	黏土	粉土	粉土夹粉砂	粉质黏土
摩阻力/kPa	QZ9L-1	24.50	23.27	81.59	52.91	49.97	17.33
	QZ9L-4	24.63	23.16	74.22	48.01	46.72	13.25
	QZ9L-5	23.34	22.78	68.89	41.56	31.57	11.91



35%。这是由于群桩中邻桩相互影响而产生的削弱。

图 5 为单桩 DZ1 和对应的群桩中各基桩 QZ9-1, QZ9-4, QZ9-5 的各层土在相应桩顶荷载作用下的端阻力对比图。从图 5 可以看出, 在相同的桩顶荷载作用下, 群桩中各基桩桩端荷载大于相应的单桩。

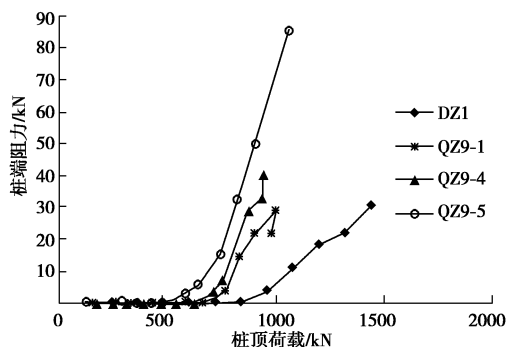


图 5 单桩与不同基桩端阻力对比图

Fig. 5 Comparison of tip resistances between single pile and different individual piles

#### (4) 桩顶反力分析

图 6 和图 7 显示的是各桩桩顶荷载占平均桩顶荷载的比例。若视承台为刚性, 各桩沉降相等, 而中桩受到群桩中其它桩的相互作用大于边桩, 边桩受到群桩中其它桩的相互作用大于角桩, 所以这种情况下为满足各桩沉降相等就有角桩的荷载最大, 边桩次之, 中心桩最小。

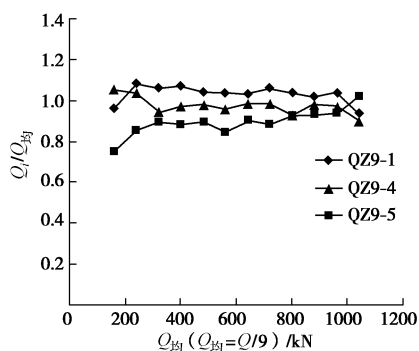


图 6 群桩 QZ9 桩顶反力分配

Fig. 6 Load distribution of QZ9

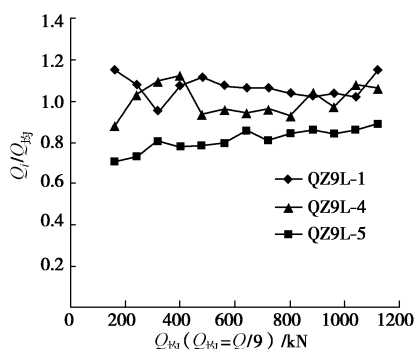


图 7 群桩 QZ9L 桩顶反力分配

Fig. 7 Load distribution of QZ9L

从图 6 和图 7 可以看出, 对于这两组群桩, 桩顶荷载的分配基本符合了中桩<边桩<角桩这一结论。而且随着荷载的增大, 各桩桩顶荷载差异有减小的趋势。此外可以看出群桩 QZ9 的各桩荷载差异比群桩 QZ9L 的小, 这可能是两组群桩的桩间距不同以及施工和土体的差异而产生的影响。

Poulos<sup>[7]</sup>给出了由弹性理论计算所得的带有刚性承台的摩擦型 3×3、4×4、5×5 群桩的桩顶反力的分配结果。通过单桩的现场试验反演出的弹性阶段本试验中土层的等效弹性模量为 32 MPa, 桩身弹性模量与土的弹性模量比  $K = E_p / E_s = 29.2 \text{ GPa} / 32 \text{ MPa} = 912.5$ 。对于 QZ9 桩身长径比  $L/d=50$ , 桩间距与桩径比  $S/d=2.5$ , 由弹性理论计算得的角桩、边桩、中桩桩顶反力与平均桩顶荷载的比值分别为 1.28、0.84、0.52。对于 QZ9L 桩身长径比  $L/d=60$ , 桩间距与桩径比  $S/d=3$ , 由弹性理论计算得角桩、边桩、中桩桩顶反力与平均桩顶荷载的比值分别为 1.25、0.87、0.54。可以看出弹性理论的计算结果也表明群桩 QZ9 的各桩荷载差异比群桩 QZ9L 的小, 但是由弹性理论计算出的群桩中各基桩的桩顶反力差异比实测结果大。

#### (5) 群桩效应系数分析

群桩效应系数  $\eta = \frac{Q_{gu}}{n_p Q_u}$ ,  $Q_{gu}$  为群桩极限承载力,  $Q_u$  为单桩极限承载力,  $n_p$  为群桩桩数。群桩 QZ9 的实测群桩效应系数为 0.71, 群桩 QZ9L 的实测群桩系数为 0.73。

考虑群桩实体周边长的群桩效应系数公式<sup>[8]</sup>:

$$\eta = \frac{p}{p'} = \frac{2(m+n-2)S_a + 4d}{\pi m n d} \quad (1)$$

式中,  $m, n$  分别为群桩的行数和列数,  $S_a$  为桩距,  $d$  为桩径。由此计算所得的群桩 QZ9 与 QZ9L 的群桩效应系数分别为 0.85、0.99, 相对误差分别为 20%、36%。

Converse-Labre 群桩效应公式<sup>[9]</sup>:

$$\eta = 1 - \tan^{-1} \left( \frac{d}{S_a} \right) \frac{2(n-1)m + (m-1)n}{\pi m n} \quad (2)$$

由此计算所得的群桩 QZ9 与 QZ9L 的群桩效应系数分别为 0.68、0.73, 相对误差分别为 -4.3%、0.04%。

考虑应力叠加的群桩效应系数公式, 是考虑影响因素较为全面的一种群桩效应系数计算方法, 也是港口工程桩基规范 (JTJ 254—98)<sup>[9]</sup>推荐的群桩效应系数计算方法。由此计算所得的群桩 QZ9 与 QZ9L 的群桩效应系数分别为 0.71、0.76, 相对误差分别为 0.82%、3.49%。

由此可见考虑应力叠加的群桩效应系数公式和 Converse-Labre 群桩效应公式与本次试验的实测数据

比较吻合。

### 3 结 论

本文给出了在南京江宁软土地区进行的单桩与 9 桩钻孔灌注桩群桩的足尺试验实测数据以及结果分析。主要结论如下:

(1) 对于长径比为 50 和 60 的桩基础, 桩身上段范围土层的侧摩阻力发挥较充分, 而桩身下段范围内土层的侧摩阻力则相对较难发挥, 基本为纯摩擦桩。

(2) 由于邻桩相互影响而产生的削弱作用, 群桩中各基桩的极限侧摩阻力与单桩的极限侧摩阻力相比有所降低, 群桩中边桩和中桩的极限端阻力较单桩的大。

(3) 将弹性理论计算的群桩反力与实测群桩反力相比较, 发现弹性理论计算所得的群桩中各基桩桩顶荷载差异比实测差异大。

(4) 考虑应力叠加的群桩效应系数公式和 Converse-Labre 群桩效应公式与本次试验的实测数据比较吻合, 可为超长桩计算提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 韩 煊, 张乃瑞, 钟 和, 等. 大型群桩基础静荷载试验与测试中的关键问题[J]. 工程勘察, 2005(1): 10 - 14. (HAN Xuan, ZHANG Nai-rui, ZHONG he, et al. Full scale static load test of pile foundation and the key problem in the test[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005(1): 10 - 14. (in Chinese))
- [2] BAI Xiao-hong, HE Wu-bin, JIA Jun-gang, et al. Experimental study on the interaction mechanism of cap-pile group-soil[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2006, 24(3): 173 - 182.
- [3] O'NEILL M W, HAWKINS R A, AUDIBERT J M E. Installation of pile group in overconsolidated clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108(11): 1369 - 1386.
- [4] PHUNG L D. Footings with settlement-reducing piles in non-cohesive soil[D]. Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, 1993.
- [5] 刘金砺, 袁振隆. 粉土中桩孔群桩承台 - 桩 - 土相互作用特性和承载力计算[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(6): 1 - 15. (LIU Jin-li, YUAN Zhen-long. Cap-pile-soil interaction of bored pile groups in silt and calculation on bearing capacity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(6): 1 - 15. (in Chinese))
- [6] Rodrigo Salgado. The engineering of foundation[M]. Newyork: Book-mart Press, 2005.
- [7] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. Newyork: John Wiley and Sons, 1980.
- [8] 史佩栋. 实用桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 114 - 121. (SHI Pei-dong. Practical pile foundation engineering manual[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999: 114 - 121. (in Chinese))
- [9] JTJ 254—98 港口工程桩基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998. (JTJ 254—98 Port engineering pile specification[S]. Beijing: People's Communications Press, 1998. (in Chinese))

(本文责编 明经平)