

竖向荷载下变刚度群桩变形性状研究

钱晓丽

(福建工程学院土木工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 在试验室进行了一系列变刚度群桩和均布群桩基础的静载物理模型试验, 并对试验结果进行了分析对比。结果表明, 变刚度群桩的位移分布方式是边桩大于中心桩, 正好和一般均匀布桩的沉降分布形式相反。其总沉降略有增加, 但差异沉降显著减少。变桩长与均布群桩相比, 增加中心桩桩长, 还能提高桩基的极限承载力和承台下地基土的承载能力, 说明均布群桩中边桩的承载能力还有富余。群桩中基桩的侧摩阻力表现与单桩不同, 侧摩阻力的发挥是自桩身下部某点向上逐步发挥。桩距越小, 这种趋向越明显。

关键词: 变刚度群桩; 模型试验; 沉降; 差异沉降

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)10-1454-06

作者简介: 钱晓丽(1970-), 女, 黑龙江鸡西人, 博士, 副教授, 从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: qxl0808@163.com。

Displacement characteristics of pile groups with varying rigidity under axial load

QIAN Xiao-li

(Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A series of physical simulation experiments for pile groups with varying rigidity and those with uniformly distributed piles under static axial load were done, and the test results were analyzed and compared. It was indicated that for the displacement distribution type of the pile group with varying rigidity the displacement of the side piles was larger than that of middle piles, this was quite the contrary of uniformly distributed piles. The total settlement increased slightly and differential settlement decreased markedly. Increasing the length of middle pile could increase the bearing capacity both of the pile groups and soils under the pile cap for varying rigidity pile groups, indicating that the bearing capacity of the side piles was latent in uniformly distributed piles. The shaft friction developed along the lower part to the middle of the pile in pile groups, different from that of single pile. The less the pile spacing, the more obvious this trend.

Key words: varying rigidity pile group; model test; settlement; differential settlement

0 引言

变刚度群桩基础是与传统均匀布桩方式不同的新型桩基础形式, 它通过变化桩距、桩长或桩径来调整各桩相对刚度, 使桩顶反力均匀, 差异沉降最小, 达到用足各桩承载力, 减小基础弯矩, 提高群桩经济效益的目的^[1]。目前, 变刚度群桩基础在重庆江津县、江苏省苏州市太仓县、河南发展大厦已经得到了应用。

变刚度群桩基础的工作性能及其承载力问题, 是目前工程界所热切关注并亟待解决的重要课题。其理论研究还远远落后于实践, 对其工作性能的认识还不成熟^[2]。本文围绕这一课题, 在实验室进行了不同桩长、桩距的模型桩载荷试验, 以增进对桩长、桩距、桩数这几个因素对变形性状和荷载传递规律影响的认识, 以便指导变刚度群桩基础设计, 使其设计更符合

其实际的工作性状, 取得较大的经济效益。

1 试验设计

试验分单桩、等桩长3桩、变桩长3桩、变桩长9桩等几种情况。多桩情形又分3倍桩径(d)桩距($3d$)和4.5倍桩径桩距两种情况。试验分5大组, 共进行10种情况的静载试验^[3]。试验组合情况见表1。

1.1 桩模型设计

模型桩采用PP-R硬质塑料管制作。塑料管直径 $d=32$ mm, 桩长 $L=400, 600, 800$ mm, 桩顶、桩端用铁皮封堵。为了测试桩身轴力的变化, 沿桩长不同

基金项目: 福建省青年人才创新项目(2007F3004)

收稿日期: 2007-09-17

部位黏贴电阻应变片,在桩端设置土压力盒以测试桩端阻力。

表 1 模型试验尺寸一览表

Table 1 Pile dimensions of model tests					
序号	A	B	C	D	E
桩数/根	1	3	3	3	9
排列方式		等桩长	变桩长	变桩长	变桩长
桩距/ nd		$3d$	$3d$	$4.5d$	$3d$
承台尺寸 (mm×mm)	96×96	288×96	288×96	384×96	288×288

试验在中国矿业大学(北京)“复杂多变环境下城市地下工程相似模拟试验系统”进行,模型箱尺寸为长×宽×高=2 m×2 m×2 m。由于模型尺寸充分考虑到了边界效应,可认为原型与模型同样置于无限大范围的地基上,上述试验模型符合物理相似关系。因此,模型试验方案的选择是通过单因素变化,对比研究不同桩距、桩长、桩数时变刚度群桩基础的力学特征。

1.2 承台模型设计

采用 6 mm 厚的预制钢板承台模型。根据上述试验组合情况,共预制出 4 个承台模型。为了测试承台底土压力的分布,在各承台底面不同位置埋设了压力盒,见图 1。

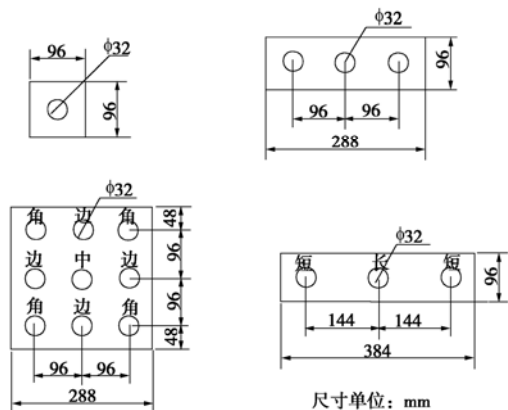


图 1 承台尺寸图

Fig. 1 Dimensions of pile caps

2 试验方法

模型箱内填以均质粉质黏土,控制含水率为 17% 左右,按每层虚铺 15 cm,夯实至 10 cm。模型桩采用埋置的方法,并按预定位置埋设土压力盒。静置一段时间使其充分固结,试验前测定基土的物理力学指标,见表 2。

2.1 模型施工

①将模型桩按桩位埋入土中并编号;②在桩端、桩间土处理设土压力盒;③静置足够时间使压桩扰动的桩周土强度得以恢复;④在桩顶上放置承台。

2.2 试验加荷

加载系统采用与整个油路系统相连的加载油缸,

由井字形主次钢梁、加强八角板和钢柱组成反力系统。

表 2 地基土的物理力学指标

Table 2 General characteristic indices of soils								
w /%	ρ /(g·cm ⁻³)	S_r	e	I_P	I_L	E_{1-2} /MPa	c /kPa	φ /(°)
16.8	1.72	52.9	0.87	11.2	0.37	4.55	15	13.6

荷载由标准压力表测定油压,由荷重传感器换算为标准荷载值。位移量测采用电子位移计观测,局部辅以千分表校核。为了测试不同深度土层的变形,采用自制的刚性变形深标观测。

加载的模式与分级:采用慢速维持荷载法,按总荷载的 1/10 分级加载,第一级荷载按 2 倍分级荷载加荷。

数据观测:加荷前,先测定各应变片和土压力盒的初读数。在每级荷载加荷后,每隔 30 min 观测一次应变片和土压力盒的读数,位移用位移计观测,并与数据采集仪相连,直至沉降达到相对稳定后再加下一级荷载。沉降相对稳定的标准为每小时沉降不超过 0.1 mm。

终止加荷条件(破坏标准):在每级荷载作用下,当桩基的平均沉降量达到前一级荷载作用下沉降量的 5 倍,或每 kN 荷载引起的沉降量不小于 0.1 mm 时认为试验达到破坏,此时可终止加载^[4]。

所有的数据采集均由 TDS-303 数字巡回检测仪完成,原始数据自动保存在计算机中。本次试验数据采集的时间间隔设置为 5 min,完全能满足试验要求。

3 试验结果分析

根据上述静荷载试验观测结果,得到各种情况静载试验 $Q-s$ 曲线和桩轴力图,以及如下试验结果。

3.1 桩基承载力和沉降的变化

将各荷载试验所得极限承载力 Q_U 与相应的 s_U 列于表 3。从表中可见,桩基的极限承载力 Q_U 随着桩数的增多而增大,随着桩距的增大而增大,随着桩长的增大而增大。在相同桩距情况下, Q_U 随着桩数的增加而增大;在相同桩数情况下, Q_U 随着桩距的增大而增大,4.5 倍桩距群桩试验中未达到极限承载力,但其沉降很小,用逆斜率法外推可预测其极限承载力 Q_U 为 3d 时 Q_U 的 1.2 倍左右。在相同的桩距、桩数情况下, Q_U 随着桩长的增大而增大,试验 B₂ 比试验 B₁ 的 Q_U 增加了 1.2 kN,而 s_U 减少了 5.58 mm;试验 C₂ 比试验 C₁ 的 Q_U 增加了 2.0 kN,而 s_U 减少了 11.63 mm。变刚度布桩试验 C 与均布群桩 B 对比可知:中心桩桩长的增加,使群桩的承载力提高,沉降减小,如试验 C₂ 的组合方式较佳,与试验 B₂ 相比,承载力增加很多,而沉降仅略有增加。设置有 3 种不同桩长的试验 E,

承载力由于桩数的显著增多,承载力最大,但沉降变化不大^[5]。与 Q_U 对应的 s_U 则呈抛物线形。反映了桩对控制沉降发挥了作用。 $Q-s$ 曲线存在相对明显的转折点,其破坏模式接近均匀土中的摩擦桩。

3.2 桩、承台分担荷载

由各桩极限承载力 Q_U 和桩身轴力图可计算出每种情况下桩承担的荷载和承台下地基土承担的荷载及各自占总荷载的比例^[6]。表 4 列出了荷载分担比。从表中可以归纳出如下几点:

(1) 不同布桩情况下桩土分担总荷载的比例各不相同。其中,以均布布桩(试验 B₁、试验 B₂、试验 B₃)承台分担的荷载比例最小,为 34.6%~51.79%;变刚度布桩(试验 C₁、试验 C₂、试验 D)为 48.53%~52.54%。

(2) 随着桩数由单桩试验 A 增加到三桩试验 B 组和 C 组,桩顶承担荷载增大,由 29.9%~45.6%增加到 47.46%~65.4%,而 9 桩试验 E 的桩顶反力达到了 73.43%。显然,承台下桩数越多,承台分担荷载的比例越小。说明在本试验条件下,增加桩数使荷载更多地由桩身承担。

(3) 变刚度群桩与均布群桩相比,增加中心桩桩长,反而能提高承台下地基土的承载能力。笔者认为,桩间土的承载能力被调动起来的原因在于:群桩中桩长不一致引起群桩效应的削弱所致,特别是试验 C₁和 B₁比较,由于中桩和边桩的桩长相差较大,可进一步发挥承台的承载能力。试验 C₁、C₂与试验 B₃比较,边桩的桩长分别减小了 25%和 50%,但桩顶承担荷载的比例却相差无几。这说明均布群桩中边桩的承载能力还有富余。

3.3 沉降与荷载关系分析

进行沉降测试的承台各特征点的位置有:承台中心和承台的边缘;在承台的边缘对称布设两个电子位移计,取二者平均值。位移测试还包括桩底沉降测试和桩间土的沉降变形。

均布群桩和变刚度基础模型试验加载过程中分为如下两个阶段:在加载初期表现为拟线性;随着荷载的增大,曲线开始偏离直线,表现为近似的双曲线形状。承台的沉降随着外荷载的增加而快速增加,其变化率大于线性阶段。若以承台中部沉降为纵坐标,变刚度群桩基础的总荷载为横坐标(荷载小于 $Q=7.5$ kN),各组试验的荷载位移曲线关系见图 2。

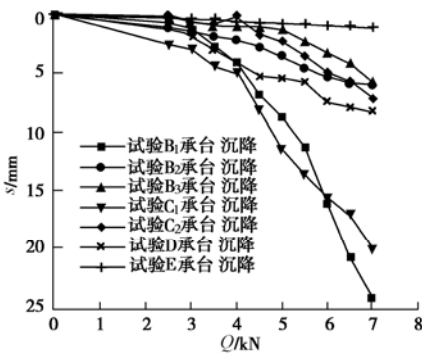


图 2 承台位移与荷载关系

Fig. 2 Relationship between displacements and loads of pile cap

(1) 加大桩长的影响

由均布群桩中试验 B₁、试验 B₂和试验 B₃的沉降曲线可以看到,随着桩长由 400 mm,加长到 600 mm,800 mm 时,承台中心的沉降由 11.38 mm 减小到 5.8,2.26 mm。试验 B₂相比试验 B₁减小了 5.58 mm,试验 B₃比 B₂减小了 3.57 mm,说明在均布群桩中,增大桩长能显著减少基础沉降,但减少的趋势是有一定限度的。作者推断,当桩长达到一定的临界深度时,增加桩长并不能减少沉降。本次试验条件下,桩长未达到临界深度。

将试验 B₁的中心桩桩长由 400 mm 增加到 800 mm,即为试验 C₁。由图可知,桩长的增加使群桩的沉降增加,但幅度不大,后期荷载($Q>6$ kN 时)变刚度的布桩方式沉降要小于均布群桩。试验 C₂比试验 B₂沉降减小,但后期荷载下又略有不同。总体来看,增加中心桩的桩长对改变承台总沉降影响不大。

表 3 静载试验的 Q_U 和 s_U

Table 3 Bearing capacities and settlements of piles in static load tests									
试验情况	单桩(A ₁)	单桩(A ₂)	均布三桩(B ₁)	均布三桩(B ₂)	均布三桩(B ₃)	变刚度三桩(C ₁)	变刚度三桩(C ₂)	变桩距三桩(D)	变刚度九桩(E)
桩长	400	600	400	600	800	400×2+800	600×2+800	600×2+800	400×4+600×4+800
距径比			3	3	3	3	3	4.5	3
Q_U /kN	3	3.6	6.0	7.2	5.6	7	9	10.8	14
s_U /mm	5	9.8	11.38	5.8	2.26	17.07	5.44	12.71	4.01

表 4 桩和承台的荷载分担比 η

Table 4 Distribution proportion of loads between piles and caps									
组别	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	D	E
桩	29.9	45.6	65.4	49.14	48.21	48.69	47.46	51.47	73.43
承台	71.1	54.4	34.6	50.86	51.79	51.31	52.54	48.53	26.57

(2) 调整桩长的影响

比较均匀布桩的试验 B₃ 与变刚度布桩的试验 C₁、试验 C₂, 桩长由 800 mm 的均布三桩, 改变为两个边桩分别减少到 400 mm 和 600 mm。试验 C₁ 的中心桩与边桩桩长之比为 2:1, 试验 C₂ 的中心桩与边桩的桩长之比为 1.33:1。由图可见, 在加荷的全过程范围内, 试验 C₁ 和试验 C₂ 的沉降要大于均布群桩的试验 B₃, 而试验 C₂ 的总沉降还要小于试验 C₁。可以说, 变桩长布桩时, 从总沉降考虑, 中心桩和边桩桩长比为 1.33:1 时更优化。但试验 B₁ 和试验 C₁ 的沉降偏大, 与施工的因素有关。由于布桩埋设要层层填土并夯实, 可能有偏差。而且基坑开挖之后, 由于自重应力的卸除, 地基土会产生回弹, 在加荷之前需要预先压载, 以剔除这种和试验无关的影响。此外, 预先少量、短时间加载, 也可以使桩土间接触, 使桩-土体系成为一个整体, 协同工作。

(3) 调整桩距的影响

变刚度布置的群桩试验 C₂ 和试验 D, 中心桩桩长为 800 mm, 边桩桩长为 600 mm, 桩距由 3 倍桩距增加到 4.5 倍桩距。在荷载 $Q=7$ kN 时, 试验 D 的沉降比试验 C₂ 的沉降大 14.04%, 略有增长。也就是说, 从承台的沉降来看, 本试验条件下, 3 d 的桩距要略优于 4.5 d 桩距的变刚度群桩布置方式。

(4) 桩数的影响

图 2 表明, 变刚度布置的九桩沉降最小, 比单桩和三桩的布置方式试验 A₁、试验 B₁、试验 C₁、试验 D 的沉降分别减少了 65.43%, 64.76%, 76.51% 和 50.97%。反映出桩数的增加可以控制沉降。

3.4 桩底沉降与荷载的关系

(1) 差异沉降与荷载的关系

图 3~8 绘出试验 B₁、试验 B₂、试验 C₁、试验 C₂、试验 D 及试验 E 的承台沉降、中心桩底沉降、边桩底沉降、角桩底沉降和桩间土沉降。

图 3 中, 试验 B₁ 中心桩的沉降要大于边桩的沉降, 最大差异沉降为 4.67 mm; 只有当荷载 $Q>6.6$ kN, 群桩达到了极限承载力时, 桩端应力向边桩转移, 使得边桩的沉降要大于中心桩的沉降, 但群桩都是在荷载下 ($Q=1/2P_U$) 工作。只有考虑复合桩基时, 才可能出现边桩沉降大于中心桩沉降的情况。

由图 4 可见, 常规等长度布桩的试验 B₂, 其中心桩底沉降要比承台的沉降多 1.48 mm, 说明在中心桩底部出现了刺入变形。而中心桩和边桩的沉降也不一致, 在加荷的全过程中, 中心桩的沉降均要大于边桩的沉降, 在荷载 $Q>11.6$ kN 时, 两者的沉降差距加大, 最终的差异沉降达到了 2.79 mm。

图 5 中, 试验 C₁ 是变桩长布桩, 桩长组合为 400,

800 mm 和 400 mm。纵观整个加载过程: 加荷初期, 中心桩的沉降要比边桩稍大一些, 在荷载 $Q=2.5$ kN 时, 两者的差异沉降仅为 0.5 mm; 当荷载 $Q>4$ kN 时, 边桩的沉降开始超过中心桩; 在最大荷载 $Q=7.5$ kN 作用下, 中心桩和边桩最大差异沉降为 3.98 mm。图 6 中, 试验 C₂ 是变桩长布桩, 桩长组合为 600, 800 mm 和 600 mm。中心桩和边桩的最大差异沉降为 3.85 mm。图 7 中, 试验 D 是变桩长布桩, 桩长组合为 600, 800 mm 和 600 mm, 桩间距为 4.5 倍的桩径。由图可见: 加载的全过程中, 边桩和中心桩的差异沉降都很小, 同一级荷载作用下, 两者的最大差异沉降仅为 1.2 mm。

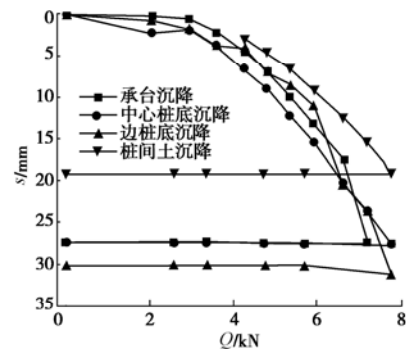


图 3 试验 B₁ 荷载与位移关系

Fig. 3 Relationship between displacements and loads in test B₁

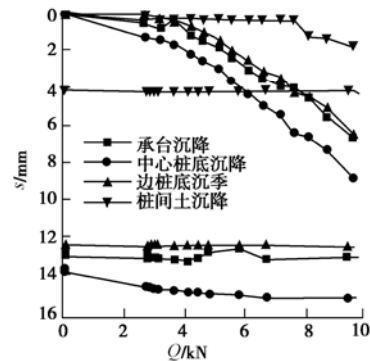


图 4 试验 B₂ 荷载与位移关系

Fig. 4 Relationship between displacements and loads in test B₂

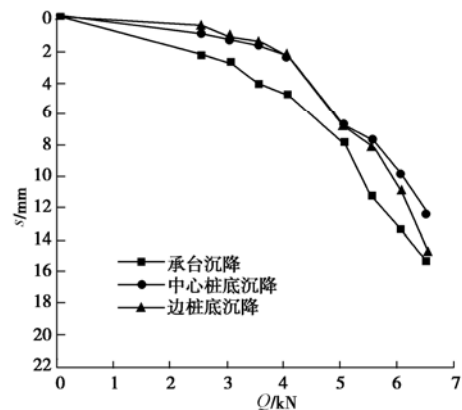


图 5 试验 C₁ 荷载与位移关系

Fig. 5 Relationship between displacements and loads in test C₁

图 8 中, 试验 E 是变桩长布桩, 9 根桩的桩长分别为 4 根 400 mm、4 根 600 mm 和 1 根 800 mm, 中心桩和边桩的差异沉降为 0.15 mm, 角桩和边桩的差异沉降为 0.34 mm。

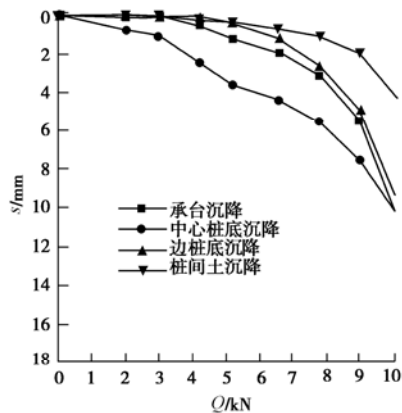


图 6 试验 C₂ 荷载与位移关系

Fig. 6 Relationship between displacements and loads in test C₂

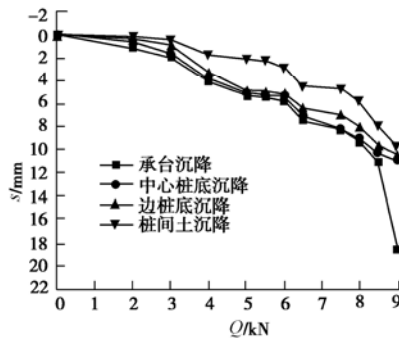


图 7 试验 D 荷载与位移关系

Fig. 7 Relationship between displacements and loads in test D

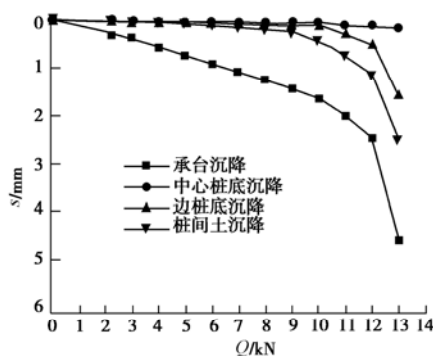


图 8 试验 E 荷载与位移关系

Fig. 8 Relationship between displacements and loads in test E

综合上述试验现象, 分析可得到如下规律:

a) 在均布群桩中, 中心桩的沉降要大于边桩, 这种不均匀的差异沉降能增大承台的总体弯距, 不利于上部结构、群桩基础和地基土的共同作用^[7]。

b) 试验 D 与试验 C₂ 作比较, 布桩的桩长、桩数均相同, 桩距由 3d 增加到 4.5d 时, 差异沉降由 3.85 mm

减小到 1.2 mm, 但是试验 C₂ 的数据点有些异常, 也不一定能说明 4.5 倍桩径桩距的变刚度群桩布置方式的差异沉降一定小于 3 倍桩径桩距的布置方式。

c) 比较试验 B₁ 和试验 C₁, 桩数相同, 增加中心桩的桩长, 沉降差由 4.67 mm 减少到 3.98 mm, 幅度为 14.78%。从减小基础沉降差的角度来讲, 增加中心桩的桩长最为有效。

d) 图 8 是变刚度群桩 9 桩的荷载位移曲线。位移分布方式是角桩 > 边桩 > 中心桩, 正好和一般均匀布桩的沉降分布形式相反。也达到了我们变刚度试验的预期效果。而且沉降的绝对值很小。在工作荷载下 ($Q=6$ kN), 角桩、边桩、中心桩的沉降差仅有 0.04 mm。

(2) 残余变形

以图 4 为例, 分析变刚度群桩系统在卸荷情况下的沉降变化, 其它各组试验与其类似。均布群桩试验 B₂ 卸载曲线与加载曲线线性部分大致平行。最大可恢复弹性变形为 1.57 mm, 残余变形为 13.69 mm。说明均布群桩基础中的基桩及桩间土, 在荷载作用下的变形以塑性变形为主。

3.5 桩身轴力分析

比较各荷载试验桩身轴力图可以发现, 单桩的桩身轴力在桩身上部变化比较明显, 说明在单桩工作时, 桩侧摩阻力沿桩身由上向下逐步发挥^[8]。群桩中基桩的桩身轴力在下部变化较大, 说明群桩中基桩的侧摩阻力表现与单桩不同, 侧摩阻力的发挥是自桩身下部某点向上逐步发挥。这是由于承台的遮拦作用和相邻桩的限制作用, 限制了桩间土的侧向挤出, 使桩基趋向于一个实体挤出。桩距越小, 这种趋向越明显。当桩距适当拉大时, 这种趋势减弱, 桩土间相对位移变大, 桩的侧摩阻力得以充分发挥^[9]。

4 结 论

通过对带承台的单桩试验 A, 均匀布桩的试验 B, 变桩长的试验 C, 变桩距的试验 D, 变桩长、变桩距的试验 E 等 5 大组群桩基础的试验分析, 可以得到如下初步结论:

(1) 桩基的极限承载力 Q_u 随着桩数的增多而增大, 随着桩距的增大而增大, 随着桩长的增大而增大。变桩长与均布群桩相比, 加大中桩桩长, 使承载力增加。但沉降变化与边桩和中桩桩长之比有关, 其中 866 组合的试验 C₂ 中承载力增加了 26%, 但沉降增加并不多。

(2) 变刚度群桩与均布群桩相比, 增加中心桩桩长, 反而能提高承台下地基土的承载能力。同时说明

均布群桩中边桩的承载能力还有富余。

(3) 在均布群桩中, 中心桩的沉降要大于边桩; 变刚度群桩的位移分布方式是边桩 $>$ 中心桩, 正好和一般均匀布桩的沉降分布形式相反^[10]。其总沉降略有增加, 但差异沉降显著减少。而差异沉降越小, 则承台的总体弯矩越小, 有利于上部结构、群桩基础和地基土的共同作用。

本次试验中, 减小基础沉降差最为有效的方法是增加中心桩的桩长。

(4) 群桩中基桩的侧摩阻力表现与单桩不同, 侧摩阻力的发挥是自桩身下部某点向上逐步发挥。桩距越小, 这种趋向越明显。

参考文献:

- [1] 刘金砺, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 151 - 157. (LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 151 - 157. (in Chinese))
- [2] CHOW Y K, THEVENDRAN V. Optimisation of pile group[J]. Computers and Geotechnics, 1987, 4(1): 43 - 58.
- [3] 王幼青, 张克绪, 朱腾明. 桩-承台-地基土相互作用试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(2): 31 - 37. (WANG You-qing, ZHANG Ke-xu, ZHU Teng-ming. The test research on the interaction in pile-cap-foundation soil[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998, 31(2): 31 - 37. (in Chinese))
- [4] JGJ 94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (JGJ 94—94 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995. (in Chinese))
- [5] 赵锡宏, 董建国, 袁聚云. 桩基减少桩数与沉降问题的研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 71 - 74. (ZHAO Xi-hong, DONG Jian-guo, YUAN Ju-yun. A study on reduction of number of piles versus settlement[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 71 - 74. (in Chinese))
- [6] 刘冬林, 郑刚, 刘金砺, 李金秀. 刚性桩复合地基与复合桩基工作性状对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 121 - 128. (LIU Dong-lin, ZHENG Gang, LIU Jin-li, LI Jin-xiu. Experimental study on comparison of behavior between rigid pile composite foundation and composite pile foundation[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(4): 121 - 128. (in Chinese))
- [7] 刘金砺. 高层建筑地基基础概念设计的思考[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 100 - 105. (LIU Jin-li. Review and optimization of the conceptual design of foundations for high-rise buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 100 - 105. (in Chinese))
- [8] 王伟, 杨敏, 杨桦. 长短桩基础与其它类型基础的比较分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1): 124 - 129. (WANG Wei, YANG Min, YANG Hua. Stress and displacement in subsoil of long-short pile foundation[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1): 124 - 129. (in Chinese))
- [9] 毛利勤, 衡朝阳, 曾立民. 竖向荷载下单桩与群桩变形性状的差异性研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 284 - 288. (MAO Li-qin, HENG Chao-yang, ZENG Li-min. Study on similarities and differences of displacement[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 284 - 288. (in Chinese))
- [10] 周正茂, 赵福兴, 侯学渊. 桩筏基础设计方法的改进及其经济价值[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 70 - 73. (ZHOU Zheng-mao, ZHAO Fu-xing, HOU Xue-vuan. Improvement of design method for pile raft foundation and its economical significance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 70 - 73. (in Chinese))