

基础-桩-土共同作用的性状与承载力研究

杨克己 李启新 王福元

(河海大学航运及海洋工程系, 南京)

提 要

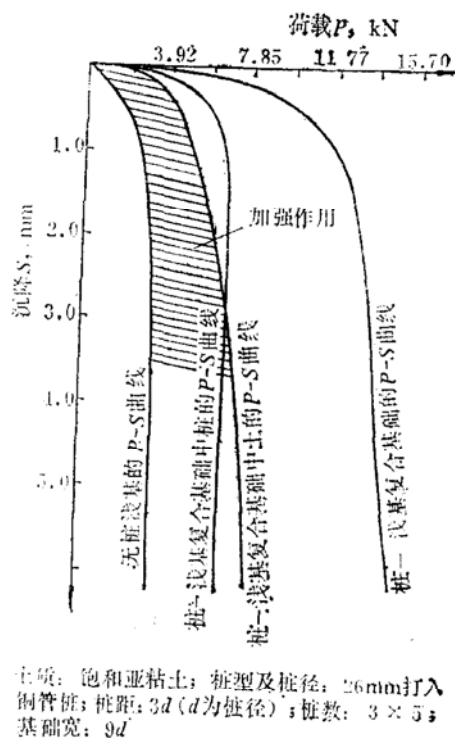
本文是结合干船坞规范编制中的桩基问题, 在调查研究和模型试验基础上提出的一份研究报告。文中通过同一种亚粘土上的不同桩距, 不同入土深度, 桩的不同排列和桩数, 承台的不同设置方式(即高桩台、低桩台与无桩基础板)等方面进行了对比试验, 并通过桩反力和土反力的荷载传感器及位移器实测了桩力、桩间土反力和变形。通过分析, 对基础-桩-土的工作性状和设计的最优化尺度及承载力等方面, 都有一些新的规律性的认识, 有些研究成果已列入我国干船坞设计规范(1985)。

一、基础-桩-土共同作用的性状

桩-浅基的复合基础, 由于桩土共同承担外荷, 不但提高了地基承载力, 而且还可减少建筑物的沉降, 对震动时减小土的液化危害也较为有利。但桩间土对基础底板是否起支承作用? 作用的大小和影响因素如何? 承载力怎样计算? 长期以来, 国内外都存在着很大的分歧, 这是由于对基础-桩-土共同工作的性状认识不一致而引起的, 经我们试验研究, 其特性有:

1. 基础和桩对上下端阻力的加强作用。这是由以下两方面引起的, 一是有一个桩群相互作用的旁压边载影响, 群桩在竖向荷载作用下, 桩的刺入破坏引起桩尖周围土的侧向变形而受到群桩阻碍制约; 另一个是桩群的遮挡作用, 它限制约束着桩间土, 从而提高了土的强度, 从图1可知, 在同一沉降下, 桩基础下桩间土反力大于无桩基础下的土反力, 而在同一荷载下, 桩基础下桩间土的沉降小于无桩基础的沉降, 桩基础下的桩群对桩间土产生的遮挡作用如图1阴影面积所示。后者的加强作用是主要的, 它随桩距的加大而减小, 随桩数的增多而加大。

2. 基础对桩身侧摩阻力的削弱作用。如图2所示, 很明显带承台的单桩与无承台的单桩



土质: 饱和亚粘土; 桩型及桩径: 26mm打入
钢管桩; 桩距: $3d$ (d 为桩径); 桩数: 3×5 ;
基础宽: $9d$

图1

的竖向变形是不大相同的,前者小于后者,这是桩的变形受到承台的限制和桩间土受到压缩而引起的,从而限制了桩上部侧摩阻力的充分发挥。我们在亚粘土上所做的对比性模型试验结果证实,因承台而引起的桩身侧摩阻力的削弱作用是明显的,如图3阴影面积所示,它随桩距和桩的入土深度与承台宽度的比值的增大而减小。

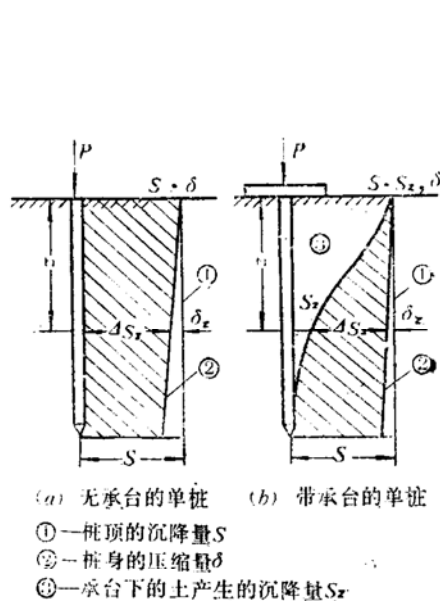


图2

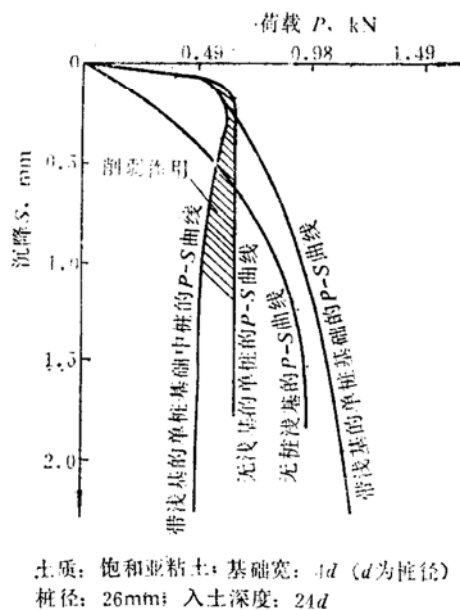


图3

上述特性也被山东河务局在济南黄河堤上大比例尺群桩的现场试验所证实^[1], 武汉水电学院冯国栋和刘祖德在砂土中的模型试验结果与我们的研究结果也大致相同^[2]。

3. 土在受荷过程中的滞后作用。在竖向荷载作用下, 基础下的桩和土受荷是非同步的, 即桩间土承受荷载在群桩之后, 一般说来, 这种基础 $P-S$ 曲线的第一拐点即为桩土分担荷载的分界点。从我们大量的模型试验中发现上述拐点一般在基础上外加荷载约为其极限荷载的50%时出现, 该拐点之前桩间土受力是很小的, 基础上的荷载主要由桩承受, 但是该拐点之后, 当外荷继续加大, 桩承载力即保持不变或变化很小, 桩间土的承载力随着外荷和沉降的加大而加大, 不论是桩头带有基础的单桩还是群桩基础, 分担荷载的规律几乎是相同的, 如图1和图3。

二、桩土的荷载分配与桩基设计的最优化尺度

(一) 荷载分配

桩基础下桩间土的承载力决定于土的种类和性质, 外荷的大小, 施工条件, 桩尖刺入量的大小, 桩距和桩的入土深度等。桩基础下桩与土是如何分担外荷的, 长期以来已引起了基础工程师们的注意, 目前国内外常用的方法有两种: 一种是经验性的, 它不论桩距和桩的入土深度如何, 都按当地同一个荷载分配比例来设计, 如上海地区土与桩按3:7来设计。另一种是变形协调法, 这种方法把桩与土的荷载沉降关系(即 $P-S$) 始终看作是线性关系, 既然在线性阶段, 如上述基础-桩-土的工作性状分析的那样, 当桩距到 $3.5d$ (d 为桩径), 外荷达基础极限荷载的50%时, 桩间土才承担荷载, 而这时桩与土的荷载沉降关系是非线性的, 这

就是变形协调法的问题所在。我们在调查研究和模型试验的基础上,经过对影响因素的分析得出如下结论:

1. 桩距对荷载分配的影响。桩间土分担外荷的比率随桩距的加大而加大,接近对数函数曲线,但是桩分担外荷的比率则反之,随桩距的加大而减小,如图(4)所示。

2. 外荷对荷载分配的影响。桩间土分担外荷的比率在桩台 $P-S$ 曲线的第一拐点,或外荷为桩台极限荷载的50%以后,随外荷的加大而加大,而桩分担外荷的比率达最大值,在这拐点之前桩台上荷载主要由桩来承受,土承担的甚小。

3. 桩数对外荷分配的影响。桩间土分担外荷的比率随桩数的增多而加大,这正反映了群桩对桩间土遮挡作用的特性。

4. 入土深度对外荷分配的影响。在桩的入土深度小于 $24d$ (d 为桩径)的情况下,桩台下桩间土承担外荷的比率随入土深度的加大而加大,桩承担的比率随入土深度的增加而减小,而入土深度大于 $24d$ 以后,桩与土分担外荷的比率与上述结论相反,如图(5)所示。

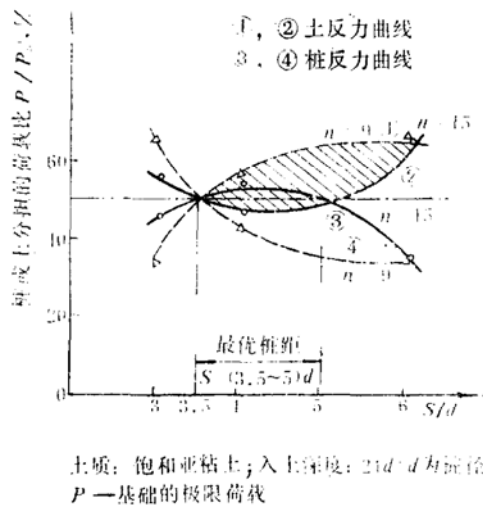


图4

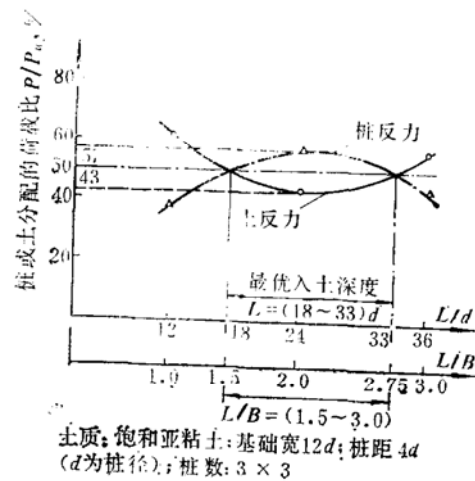


图5

5. 经验公式。针对低桩基础的承载力,我们在同一种土(重塑饱和亚粘土),但在不同桩距($D=3d\sim 6d$),不同入土深度($l=12d\sim 36d$)和不同桩数($n=1\sim 15$)等条件下,完成了多组对比性的模型试验,根据试验数据,用回归分析法,提出了下面关于荷载分配的经验公式:

$$\text{土分配的百分率: } \frac{P_s}{P_u}(\%) = 25.35 + 6.7 \frac{D}{d} \quad (1)$$

$$\text{桩分配的百分率: } \frac{P_p}{P_u}(\%) = 74.65 - 6.7 \frac{D}{d} \quad (2)$$

式中 P_s ——桩间土反力; P_p ——桩反力; P_u ——低桩基础极限承载力; D ——桩距;
 d ——桩径。

上述经验公式一般适用于粘性土,桩距 $D=(3.5\sim 6)d$,桩的入土深度与基础宽度之比 $l/B\approx 1.5\sim 3.0$ 。本公式的计算与国内外原型和模型试验结果的比较见表1,从表中可以看出本公式的计算结果与国内外的模型和原型的试验结果比较接近。在粘性土地基上不可能进行现场试验的情况下,上述经验公式可供设计低桩基础(或桩-浅基复合基础)时参考使用。

表1

笔者公式与国内外有关试验结果的比较

试验单位 或研究者	地基上	模型及尺度	桩距	桩台承载力中桩间 土承担的比率(%)
笔者公式	粘性土	桩距: $D = (3.5 \sim 6)d$ 桩长与基础宽度 的比, $l/B = 1.5 \sim 3$	$3.5d$	48.8%
			$4d$	52.3%
			$6d$	65.53%
笔者的模 型试验	饱和亚粘土 $r = 1.97\text{g/cm}^3$ $S_r = 0.91$ $I_p = 14$	铜管打入桩 桩径 $d = 26\text{mm}$ $l/B = 1.0 \sim 3.0$ 桩数 $n = 6 \sim 15$	$3d$	$n = 9, 34\%; n = 15, 55\%$
			$3.5d$	50%
			$4d$	$n = 9, 57\%; n = 15, 46.4\%$
			$6d$	$n = 9, 65.3\%; n = 15, 65.63\%$
J. Palka等 ^[3] (波兰)	粘性土; 相对稠度 $I_L = 0.2 \sim 0.3$	Frank和 Wolfsholz型 桩		40% (根据单桩和单桩基础试验结果推荐值)
R. Butterfield ^[4] (英国)	土的泊松比 $\mu = 0.5$ 桩的杨氏模量 与土的剪切模 量之比 $\lambda = \infty$	$\frac{l}{d} = 40$	$2.5d$	30%
			$5d$	40%
		$\frac{l}{d} = 20$	$2.5d$	约50%
			$5d$	约60%
第九设计研究院 (上海)	粘性土 (上海某船厂 现厂试验)	$d = 26\text{cm}$ $n = 6$ $l = 4 \sim 4.5\text{m}$ 桩台 $2 \times 3\text{m}$		45%
爆扩桩试验 ^[5] (土木工程界)	亚粘土 扩大头下 $E = 75$ 桩台下 $E = 50$	桩径 $d = 26\text{cm}$ 扩大头 $D = 78\text{cm}$ $n = 6$	$D = 280\text{cm}$	42.6%~51%(试验值) 用本文公式计算为49.4%
Hooper, 伦敦 ^[6] 海德公园营房 桩筏基础	伦敦粘土	51根灌注桩筏基 d 为91cm, 扩大 的底座 d 为224cm		施工结束时40% 3年后34%

(二) 桩基设计的最优化尺度

1. 关于优化桩距。从图4试验结果得出, 最优化的桩距应该在土反力与桩反力曲线重迭面积最小的范围, 即 $D = (3.5 \sim 5.0)d$ (d 为桩径), 当 $D < 3.5d$, 不仅桩数太多, 而且施工困难, 若 $D > 5d$, 则桩台下由于土承担外荷的比率太高, 而其余由桩承担的太低, 换言之, 在那种情况下, 桩是不起作用的, 但桩台基础加大了, 从而增加了造价, 是不经济的, 由黄委山东河务局和中国建筑研究院地基所在黄河洛口粉砂地基上大比例尺的现场试验结果得知, 在桩距 $D = (2.5 \sim 3.5)d$ 范围内, 基础承载力的增长幅度大于总造价的增长幅度, 认为

$3d$ 是最优桩距, 索尔斯(G.F.Sowers)¹⁷在粘性土上的模型试验也认为 $3d$ 是最优化的设计桩距, 他们从不同的研究观点得出的最优化桩距与我们研究的结果也是相近的。对于像干船坞这样受拉、压荷载作用的建筑工程, 其最优化桩距应定在群桩抗拉和抗压效率系数差别不大的范围, 如图6所示, 其变化范围在 $(3 \sim 4)d$, 与上述建议也几乎相同。

2. 关于优化的入土深度与基础宽度之比。笔者在相同土壤条件下, 不同入土深度的对比模型试验图5得知, 在桩土共同工作下, 其最优化的入土深度 $L_b = (1.5 \sim 3.0)B$, (B 为基础宽度), 如上节指出的那样, 由于桩台对桩侧摩阻力的削弱作用, 是随桩的入土深度与桩台宽度的比值的

减小而加大的。从我们已完成的桩台下桩间土的竖向变形的试验结果来看(图7), 在桩的入土深等于桩台宽度时($l = B$), 实测土的沉降约为桩台基础总沉降的20~30%, 在 $l = 1.5B$ 时

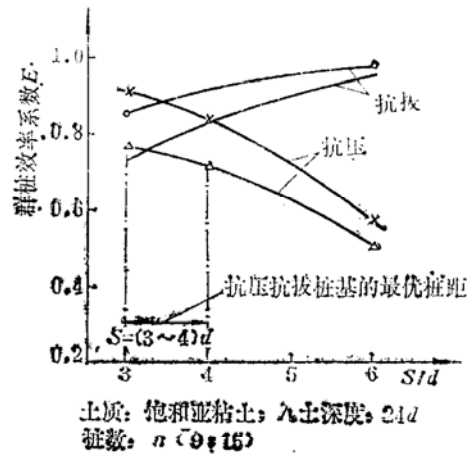


图6

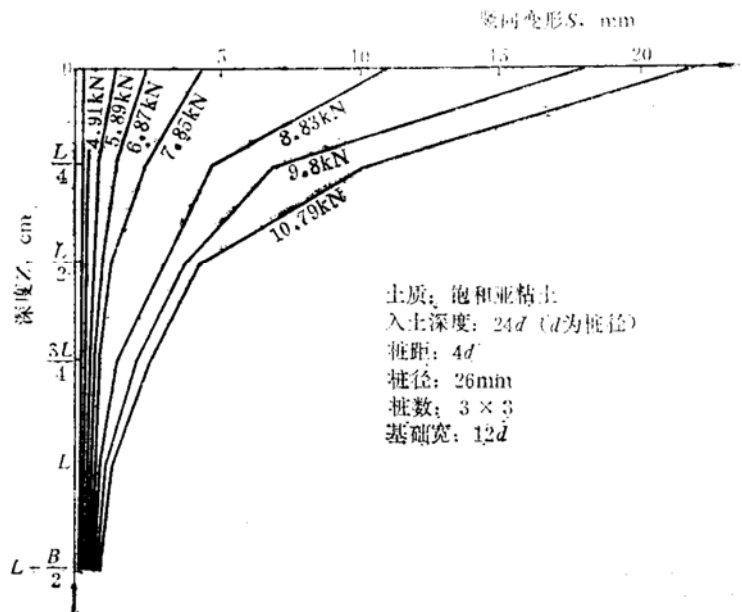


图7

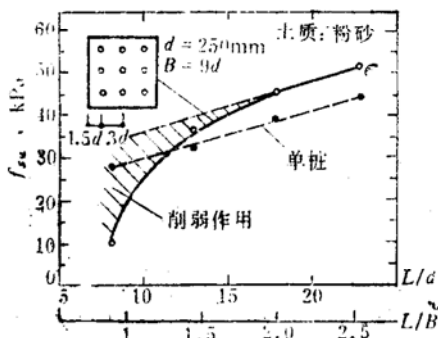


图8

约为桩台总沉降的10~15%, 所以说如果桩的入土深度过短($l < B$), 整个桩身将处于桩台下土的压缩变形区之内, 桩的作用甚小, 等于浪费, 所以最优化的入土深度应该大于或等于 $1.5B$ 为宜, 结论与太沙基的研究结果($l \geq B$)相一致, 也为黄河洛口大比例尺的现场试验所证实, 如图8所示, 当 $l/B < 1.5$ 时, 桩台对摩阻力的削弱作用随 l/B 的减小而加大。我国土木工程界一般认为, 只有短桩才须考虑桩和桩台(即桩和土)的共同作用, 上述分析证

明,这是不正确的,它必须有一个界限,而不是越短越好,同时入土深度也不宜过深,若 $l > 3B$,由桩负担的荷载百分比过大,土承担的过小,也是不经济的,所以最好将桩的入土深度取在 $1.5B \sim 3B$ 之间,上述研究成果已列入我国干船坞设计规范(1985)。

三、桩-浅基复合基础(或低桩基础)承载力计算方法

(一)现行计算方法的主要问题

1.按照实体深基础的整体剪切破坏法。这是在土木工程界最流行的方法,一是以太沙基为代表的方法,广泛应用于日本和美国,其承载力等于群桩底面积与周边上摩阻力之和;其次是以有关规范为代表的方法,如西德、苏联和我国,它们都不计及群桩周边上的抗剪力,而是将群桩底面积扩大,然后再计算它的承载力。这类方法只有在桩距小于等于 $3d$,群桩基础可能象实体深基础那样产生整体剪切破坏时才接近于实际,这是为大量的模型试验所证实的,如果不是这样,而凡是群桩,不论桩距大小,它的承载力都按实体深基础进行整体剪切核算,那就不符合实际了。

2.视为桩与浅基各自承载力之和的叠加法。一是以澳大利亚78年的桩基规范^[8]为代表,其方法之一是:低桩基础的承载力等于桩台下各桩的承载力之和,再加上桩台的净面积(扣除桩的面积)的承载力,这种简单地加起来,并没有考虑本文上述的桩土工作的三个特性,是与实际不符的。我国有些工程师从本地的试验资料入手,来计算低桩基础的承载力,有的工程师考虑了端阻力的加强作用,在承载力的计算中,除上述两项迭加值外,又增加了一个承载力的增量值,波兰J.Palka的方法与他们的的方法相同;而有的工程师则相反,考虑了桩台对桩侧摩阻力的削弱作用,在上述两项叠加值中又减去一项承载力的减小值;近年来我国有的研究者,虽然在低桩基础的研究中同时考虑了加强作用和削弱作用,并对桩与土的承载力都加以修正,但在确定具体的修正系数时还有一定的困难。

3.作为桩台下每根桩承载力之和的高桩承台法。当计算桩-浅基复合基础承载力时,通常假定整个建筑物的荷载全部靠桩传到地基中去,而桩台只起到连接桩头和传递上部荷载的构造作用,即桩台下的地基土在承载力的计算中是不起作用的,这只有在由于地基固结而可能使桩台脱空时,该法才接近于实际。总的说来,在设计桩-浅基复合基础时,本法不适用下列情况:①对于基础下的桩间土不致产生自重固结沉陷、湿陷而与桩台脱空时的低桩基础;②对于桩距大于 $3.5d$ (d 为桩径),桩的入土深度小于 $3.0B$ (B 为基础宽度),且桩台外荷大于基础极限荷载的50%时的低桩基础;③对桩尖土的刺入变形大于桩间土的压缩变形的低桩基础。

(二)建议的方法

鉴于上述现行方法存在的主要问题,我们认为,关于桩-浅基复合基础的承载力不能以本地区的局部经验来代替普遍规律,而这种基础下桩、土与桩台是相互制约和相互依存的,最可靠的方法是进行工程原型的桩-浅基复合基础的现场试验,但是由于它比单桩试验困难得多,而且费用非常高,是难以实现的,所以我们建议进行桩帽着的单桩现场试验,以便求得单桩承载力,然后乘以群桩效率系数,即可得到桩-浅基复合基础的承载力,而群桩效率系数可通过现场在同一条件下,用大比尺的单、群桩对比试验的方法去求得,因为这样可使基

础-桩-土的工作性状与实现低桩基础较为相似。并统一了上述各法的矛盾,也可应用于工程实践。下面是笔者从模型试验结果得到的经验公式,它是在饱和亚粘土中,通过不同桩距、不同入土深度及不同桩数的对比性模型试验中完成的,其结果如表2、表3及图9所示,并根据试验数据用回归分析法得出如下桩-浅基复合基础的群桩效率的经验公式

$$E = 1.127 - 0.098 \frac{D}{d} \quad (3)$$

式中 E —群桩效率系数; D —桩距; d —桩径或边长。该经验公式的相关系数 $r = -0.909$,其相对误差见表2,对小桩距($D = 3d$),或短桩($l = B$ 或 $l = 12d$),相对误差偏大一点(12.5%),但这样的桩距和桩的入土深度不是最佳的,已很少采用,在粘性土地基上对于实际工程的桩-浅基复合基础的承载力,在不可能作现场试验的情况下,式(3)的群桩效率系数可供设计时参考使用。但对于桩距小于三倍桩径时的群桩基础,仍按整体剪切破坏的假想实体深基础进行计算,对于桩台下的地基土,由于固结而可能使桩台基础底面脱空时,则仍按高桩台式的群桩基础进行计算,而不考虑桩间土对桩台的支承作用。

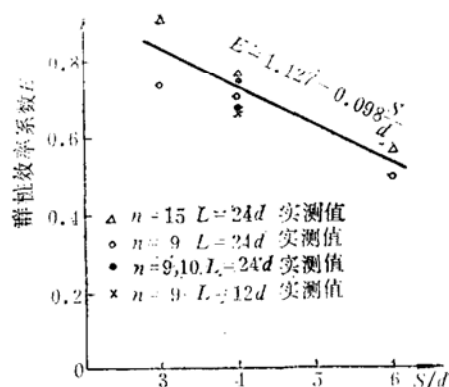


图9

表2 模型单桩低桩基础荷载试验结果

基础宽	桩入土深度	极限承载力 (N)
4d	12d	1177.2
6d	24d	2746.8
4d	24d	一根为1373.4, 另一根为1275.3
3d	24d	1030
4d	36d	1765.8

注: d 为桩径

表3 低桩基础群桩效率系数的比较

桩距	桩入土深度	桩数 n	实测值 E_m	笔者公式计算 E_c	相对误差 (%)
6d	24d	15	0.57	0.539	5.4
4d	24d	15	0.77	0.735	4.5
3d	24d	15	0.91	0.833	8.5
6d	24d	9	0.50	0.539	-7.8
4d	24d	9	0.71	0.735	-3.5
3d	24d	9	0.74	0.833	-12.5

续表3

桩距	桩入土深度	桩数 n	实测值 E_m	笔者公式计算 E_c	相对误差(%)
$4d$	$36d$	9	0.68	0.735	-8.0
$4d$	$36d$	10	0.75	0.735	2.0
$4d$	$12d$	9	0.66	0.735	-11.0

四、结论与建议

1. 桩-浅基复合基础的 $P-S$ 曲线(荷载与沉降的关系曲线)一般是缓变形的, 和陡变形的单桩不同, 也比高桩台式群桩的 $P-S$ 曲线平缓, 不呈现明显的破坏特征, 一般没有明显的拐点, 但基础下桩群的 $P-S$ 曲线却是陡变形的, 当基础上所受的外荷为其极限荷载的一半时, 曲线立即陡降, 各桩力基本上保持常数, 不随外荷的增大而增大, 而基础下桩间土的 $P-S$ 曲线是缓变形的, 由于桩的遮挡侧限影响, 它比无桩浅基的 $P-S$ 曲线更平缓, 在其所受外荷为极限荷载的一半以后, 桩间土能承受的荷载随基础上外荷的加大而加大。

2. 基础-桩-土是相互作用, 相互影响, 相互依存的。其工作特性表现在: 基础和桩对上下端阻力的加强作用; 基础下桩身上部侧摩阻力的削弱作用; 桩间土在受荷过程中的迟后作用。设计桩基时, 若考虑上述特性, 便可节省造价。

3. 要满足桩间土能支承基础传来的荷载, 它们的条件是: 基础下桩间土不致产生自重固结沉降、振陷、湿陷而与基础脱空; 基础的荷载要大于其极限荷载的一半, 桩距大于 $3.5d$ (d 为桩径或边长), 入土深度大于 $1.5B$ (B 为基础宽度); 桩尖土的刺入变形大于桩间土的压缩变形。

4. 桩-浅基复合基础桩与土分担外荷的比率跟地基土的性质、桩距、桩数、桩的入土深度、所受外荷的大小以及桩尖刺入变形与桩间土的压缩变形的差值大小等因素有关系。对于超固结的粘性土和砂性土, 由于下沉完成得较快, 桩土分担外荷的比率随时间的增长而变化不大, 桩间土分担外荷的比率一般是随桩距、外荷、桩尖的刺入变形与桩间土的压缩变形的差值等因素的增大而增大的, 随桩数和桩的入土深度的增加而减小的。对其他粘性土还必须考虑随时间的延长而使土固结的影响, 设计桩基时, 考虑桩土共同作用时, 最优化的桩距为 $3.5d$ 至 $5d$ (d 为桩径或边长); 最优化的入土深度为 $1.5B$ 至 $3B$ (B 为基础宽度)。

5. 桩-浅基复合基础承载力的确定方法要充分考虑上述基础-桩-土共同工作的三个特性, 根据不同的具体条件可分别按本文所建议的三类方法确定之。在不可能作低桩式群桩试验的条件下, 在一般粘性土地基上, 可按本文推荐的以桩帽着的单桩试验为对比的群桩效率系数的方法进行计算确定。

参加试验的还有南京航务专科学校的吕春暖、吴友斌、黄萍等三位同志。

参 考 文 献

- [1] Liu Jinli et al., Cap-Pile-soil Interaction of Bored Pile Group. Spected works of Geotechnical Engineering, Special Volume in Commemoration of the Golden Jubilee of ISSMFE, 中国建筑工业出版社, 1985.
- [2] Feng Guodong and Liu Zude, A Calculating Model of Cap-pile-soil interaction,

Proc. 11th ICSMFE, 1985.

- [3] Palka, J. and Naboreczyk, J., 附带浅埋基础的桩基承载力, 第九届国际土力学与基础工程会议录, 地基与基础译文集(3), 中国建筑工业出版社, 1980年。
- [4] Butterfield, R. and Banerjee, P.K., The Problem of Pile Group-pile Cap Interaction, *Geotechnique*, 1971. No.2.
- [5] 爆扩桩基础编写组, 爆扩桩基础, 中国建筑工业出版社。
- [6] Tomlinson, M. J., 桩的设计和施工, 1977, 朱世杰译, 人民交通出版社。
- [7] Sowers, G. F., The Bearing Capacity of Friction Pile Groups in Homogeneous Clay from Model Studies, *Proc. 5th ICSMFE*, Vol.2, 1961.
- [8] Australian Standard, Rule for the Design and Installation of Piling, (AS2159-1978) Published by the Standard Association of Australia.

Study on Behaviour of Footing-Pile-Soil Interaction and Bearing Capacity

Yang Keji, Li Qixin, Wang Fuyuan

(Hehai University, Nanjing)

Abstract

A series of experiments in pile foundation was performed with a variety of pile layout spacing, embedded depth, number of piles as well as position of pile cap but with same soil-sandy clay. Measurements of reactions and deformations of piles and nearby soil were conducted.

Based on tests results some rules concerning the behaviour of footing-pile-soil system during working were founded, and optimized dimensions and bearing capacity of the system were suggested. These results have been used in compilation of china design code for drydock (1985 edition).