

低桩基础的垂直承载力

周福田

(南京航务工程专科学校)

提 要

低桩基础垂直承载力问题,实质是一个桩土共同承担外荷载的问题。土直接承担外荷载的大小与桩距、桩长和土的物理力学性质有关。本文以实测资料为依据,对桩土共同作用问题进行了分析研究,提出了简单实用的近似计算方法,并初步探讨了低桩基础在工作过程中底板与基土可能发生脱空的问题。

一、引 言

桩基础是一种历史悠久的人工地基,在基础工程中占有重要的地位。但是,桩基础本身的造价较高,如何改进和完善桩基础的设计方法,做到既安全可靠,又经济合理,这是亟待研究解决的问题。

通常设计低桩基础时,总是假定全部荷载都由桩传给地基。但事实上土是或多或少地承担了由底板直接传来的一部分荷载。特别是软土地基中的摩擦短桩,由底板直接传给土的荷载还是相当可观的(按弹性理论分析,一般占20~60%)。对于一般大型桩基工程来说,如造价节省10%,就可能减少数十万元的投资。因此,作为设计依据,如何根据具体情况确定在桩基达到极限承载力时由底板直接传给土的较为可靠的荷载数值,这是个重要的问题。

外荷载通过桩基传到地基深部是一个复杂的过程。其工作机理尚不十分清楚。因此进行严格的数理分析和公式推导,不仅极为困难,而且由于某些假设条件不够确切,计算结果与实际情况也不一定相符合。关于桩土共同作用的研究工作现已受到重视并在逐步地开展。有关参考文献较少,特别是系统地、有目的地研究底板、桩和土作用的实测资料更为缺乏。本文在分析试验资料的基础上对低桩基础垂直承载力问题进行了一些探索性的研究。

二、低桩基础垂直承载力研究方法简介

(一)考虑桩土共同作用方法之一

考虑桩土共同作用最普通的一种方法,是将低桩基础的承载力看成是相应高桩群与底板单独工作的承载力之和。现列举下述三项研究成果:

1. 1978年澳大利亚桩基规范^[1]规定,低桩基础的极限承载力取下列两者中较小的值:

①按整体破坏计算的极限承载力加出檐承台外伸部分的承载力。②单桩极限承载力乘以桩数,并加上底板面积(扣除桩的面积)乘以地基的极限承载力。即

$$P = nP_u + (ab - nA_p)q_u \quad (1)$$

式中 P ——低桩基础极限承载力;

- n ——桩基中总的桩数;
 P_u ——单桩极限承载力;
 a, b ——分别为桩基底板的长和宽;
 A_p ——单桩的横截面积;
 q_n ——地基的极限承载力。

当桩距甚小时, 第一项数值较小, 当桩距超过一定值以后转而变为第二项数值较小。但桩基产生刺入破坏时取后者作为极限承载力值得商榷。桩和土共同作用的结果有互相削弱的一面, 也有互相加强的一面。但削弱的部分大, 特别是土对底板的直接支承作用削弱了很多^[2]。由于这一原因, 即使当桩基与浅基产生相同沉降时, 桩间土对底板的支承压力也远小于浅基时的压力。表1是无桩承台与各种桩距的低桩基础均产生30mm沉降时, 桩间土对底板的支承压力。从表中可见, 有桩与无桩的差别很大, 且桩距不同时, 其桩间土的支承压力呈规律性变化。另外, 因为采用桩基础不仅为了满足承载力的要求, 有时也为了减小沉降。这时土的支承作用就更不能充分发挥。所以, 当桩距超过高桩群整体破坏极限桩距后一律考虑以地基极限承载力作为桩间土的支承压力是不合适的。

表1 各种桩距低桩基础沉降30mm时
桩间土对底板的支承压力

桩距	无桩	$S=2d$	$S=3d$	$S=6d$
土对底板的 支承压力(t/m ²)	20.0	3.0	5.8	10.8

d 为桩直径

2. 浙江省建筑设计院勘测队陈如连经过试验在《短桩与承台共同作用的初步认识》^①一文中认为, 低桩基础的极限承载力应为相应高桩群与底板作为浅基时的极限承载力之和减去由于底板的作用而使桩承载力减小的值。即

$$P = P_p + P_s - P_f' \quad (2)$$

式中 P ——低桩基础的极限承载力;

P_p ——相应高桩群的极限承载力(按有关规范或地区经验计算);

P_s ——底板(总面积减去所有桩的截面积)单独工作的极限承载力;

P_f' ——桩的承载力减小值(通过试验从相关关系中找出经验系数来确定)。

3. 波兰J. Palka等研究得出的结论^[3]与《短桩与承台共同作用的初步认识》一文^①相反, 认为低桩基础的极限承载力高于相应高桩群和浅基极限承载力之和, 文中并未说明原因。从试验情况看与陈文^①极为相似, 但结论不同。应当指出, 他们试验用的单桩与实际工程中的大型桩群工作机理是不相同的。单桩试验时桩带动土下沉的现象不明显。所以承台下土的压力远大于群桩中桩间土的支承压力。图1是黄委会山东河务局桩基试验某桩组极限荷载时底板下土压力的分布实况。其中间部分的工作条件类似于大型低桩基础的桩间土, 而带承台单桩情况下土的支承压力类似于图中边缘底板下土的支承压力。在考虑低桩基础承载力时忽视这种差别, 那么所得出的结论自然与实际情况就不相符合。

(二)考虑桩土共同作用的方法之二

另一种考虑桩土共同作用的方法是在计算桩基底板的土反力时, 将底板当作弹性支座连续梁或板来计算, 类似的还有变形协调解法等。这些方法在理论上是不存在问题的。但由于

①陈如连, 短桩与承台共同作用的初步认识, 浙江省建筑设计院勘测队, 1980年5月。

桩土作用的相互影响, 它们实际的弹性模量无法精确确定。

(三)有限单元法

有限单元法是分析计算的有力工具, 在桩土共同作用方面已取得了一些重要的成果。但目前由于桩土共同作用的机理尚不清楚, 计算参数难以确定, 其计算相互之间误差甚大。应用此法效果并不理想。

(四)经验法

我国工民建地基规范(TJ7-74试行)规定, 一般的大型桩基, 在桩距小于 $6d$ 时, 若为摩擦桩可按假想实体深基础计算。桩数少于 9 根的、条形基础下的桩不超过两排的摩擦桩桩基础, 其承载力为单桩承载力之和, 不考虑土的支承作用。在桩距大于极限桩距时, 一般地讲前者偏于不安全, 而后者又偏于保守(此时土的支承压力较大, 但恰恰不予考虑)。

上海桩基础的使用经验和设计方法^②一文介绍, 上海市桩基的惯用设计方法有三种: ①中长桩和长桩基础, 基础传来的荷载全部由桩承担。②短桩基础, 土承受 $6 \sim 8 \text{ t/m}^2$, 总荷载的其余部分由桩承担。桩的许可表面摩阻力 f_a 取 1 t/m^2 。③短桩或桩尖未进入硬层的中长桩基础, 桩承受总荷载的 $70 \sim 80\%$, f_a 取 1 t/m^2 或稍大些。土承担其余的 $20 \sim 30\%$, 一般取 $2 \sim 3 \text{ t/m}^2$ 。涉及桩土共同分担荷载的是②、③两种。笔者认为上海的经验比较接近实际。

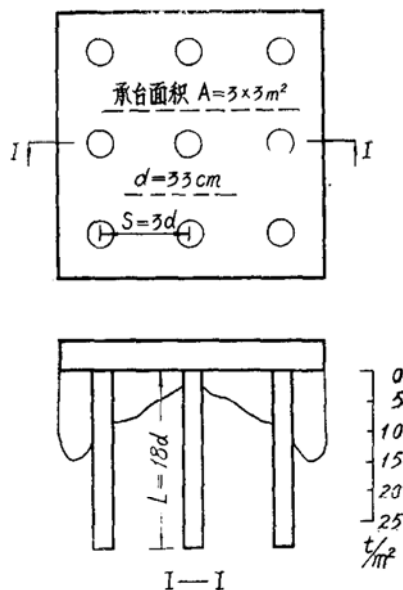


图1 某桩组极限荷载时底板下压力分布的实测情况

三、试验介绍及成果分析

1980年下半年, 笔者在华东水利学院港工结构试验室进行了十几组模型桩(包括单桩、高桩群、低桩群及无桩承台)的试验, 还参加了黄委会山东河务局在济南洛口进行的钻孔灌注桩桩基试验。所获资料是本文定量地分析计算的主要依据。黄委会山东河务局的试验规模很大, 各种系列的资料比较齐全。在试验资料中挑选桩数 $n = 3 \times 3$, 桩径 $d = 25 \text{ cm}$ 的几组低桩群中的一颗中心桩及其所辖底板面积上土的支承压力加以研究, 这样分析的结果能与实际工程中的大型桩基相近。

桩径 $d = 25 \text{ cm}$, 桩长 $L = 18d$, 但桩距不同的各桩组的中桩所辖底板面积上土的支承压力实测值列于表 2。

表2 $d = 25 \text{ cm}$ $L = 18d$ 各桩组在极限荷载时土的支承压力实测值

桩距	$S = 2d$	$S = 3d$	$S = 6d$
土对底板的平均支承压力(kg/cm^2)	0.272	0.623	1.16

②童翊湘, 上海桩基础的使用经验和设计方法, 华东电力设计院, 1979年。

桩径 $d = 25\text{cm}$, 桩距 $S = 3d$, 但桩长不同的各桩组它们中间一颗桩所辖底板面积上的平均压力变化如图2。明显可见, 支承压力随桩长的增加而减小。

从试验时底板下土的支承压力随所加荷载而变化的规律来看, 在桩基达到极限荷载时, 底板与桩间土之间的压力远未到达底板单独工作时的极限支承压力。表3是某桩组试验实测的1*、2*、3*土压力盒在不同级别荷载下的压力值。从表中可看出, 极限荷载357t 时及其以前各级荷载所测得的土压力级差甚小。极限荷载以后, 沉降加快, 桩有了较大的刺入, 土的支承压力级差才逐渐增大。

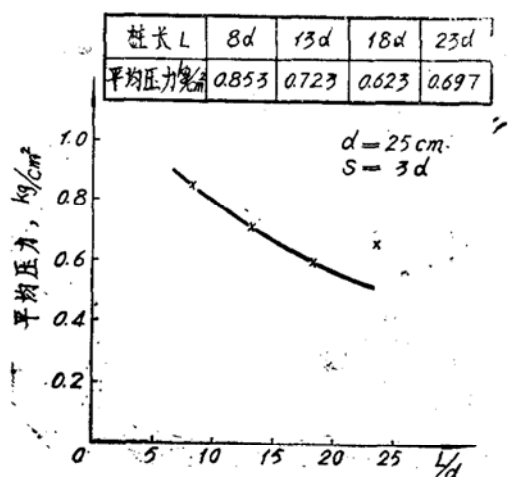


图2 不同桩长各桩组底板的平均压力

表3 极限荷载前后的实测压力值

荷载级别 (t)	土压力盒实测值(kg/cm²)		
	1*	2*	3*
286	0.23	0.55	0.58
322	0.25	0.60	0.64
357	0.27	0.64	0.69
393	0.36	0.72	0.79
428	0.51	0.79	0.88

对以上实测资料进行分析以后, 可得出如下的几点结论: ①在桩基础中, 桩的下沉是要带动周围土同时下沉的。桩越密, 桩带动土同时下沉的影响就越大; ②桩基底板下, 外周土的支承压力明显大于里面桩间土的支承压力; ③在桩基础达到极限荷载时, 土对底板的支承压力还远未到达底板单独工作时的极限值。④低桩基础的极限承载力要小于相应高桩群与无桩承台极限承载力之和。⑤桩径、桩长相同、桩距不同时, 在整个桩基达到极限承载力时, 土对底板的支承压力随着桩距的增大而增大。⑥桩径、桩距相同、桩长不同时, 在整个桩基达到极限承载力时土对底板的支承压力随着桩长的增长而减小。

四、低桩基础垂直承载力的近似计算

(一) 桩基承载力及桩土变形概述

桩土共同作用的机理, 应从两者变形协调来考虑。但实际状态的弹模难以确定, 只能与前面第二, (一)节中计算方法一样, 将低桩基础的承载力看成是高桩群和承台(底板)承载力的修正叠加。由于承台的作用, 桩的上部摩阻力减小。在桩下部, 由于承台引起土中的附加应力而使摩阻力增加。但这里主要的是桩使土对承台的支承力下降²⁾。当然, 桩的存在限制了土的侧向变形, 使承台承载力略有增加, 但远较桩引起的土对底板支承力的下降为小。

若将桩在地基里面的作用情况看成是纯摩擦桩, 应用明德林(Mindlin) 解积分求出地面各点的沉降, 并和 $L = 0$ 时的地表沉降比较如图3。图中虚线和实线之间的差别就是有桩存在时土对底板实际支承力降低的原因。

从许多高、低桩群的效率曲线可以看出, 高、低桩群在高桩群整体破坏的极限桩距内,

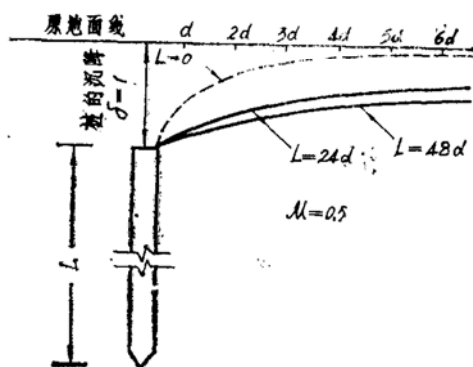


图3 按明德林公式计算的地面沉降

两者的承载效率几乎是完全一致的。只有在超过高桩群整体破坏的极限桩距以后才各自分开，低桩群的效率按原来的趋势继续增加，高桩群则增加甚微。实测表明，在高桩群发生整体破坏的极限桩距以内的相应低桩基础中，土对底板并不是没有支承压力，不过是压力较小罢了。那么为什么它不能提高低桩基础(相对于同样的高桩群)的效率呢？原来这部分土的支承力实际上被作为桩侧摩阻力减小值的补偿了。在高桩群整体破坏的极限桩距以内高、低桩均按整体破坏计算。当桩距超过高桩群整体破坏

的极限桩距以后，高桩按刺入破坏的效率计算，低桩应在相应高桩群的基础上再增加考虑土对底板的支承作用。

(二) 基本假设

1. 在高桩群整体破坏的极限桩距以内，因桩的下沉而带动桩间土同时下沉，使低桩群的桩间土全部失去对底板的支承作用。

2. 当桩距超过高桩整体破坏极限桩距以后，在低桩基础中设桩所带动下沉的土与整体破坏极限桩距时带动下沉的土一样多而不发生变化，即极限桩距范围内土对底板的支承力仍按零计算。(实际上作为桩侧摩阻力减小的补偿，从而使得在计算公式中桩的承载力可按相应高桩群的承载力考虑。) 极限桩距范围以外的桩间土在桩基达到极限荷载时可以发挥其对底板的支承作用。

(三) 计算公式

低桩基础的极限承载力等于相应高桩的极限承载力加土对底板的支承反力。即

$$P = P_p + P_s \quad (3)$$

式中 P ——低桩基础极限承载力；

P_p ——相应高桩群的极限承载力；

P_s ——土对底板的支承力。

相应高桩群的极限承载力 P_p 的计算采用交通部制订的我国港口桩基工程规范(1981)所介绍的方法，即文献[5]提出的公式。它比三十年代沿用至今的康弗斯-拉巴雷(Converse-Labarre)等公式更能反映多种因素对群桩承载力的影响，更接近实际。

土对底板的支承力 P_s ，大型桩基和桩数不超过九根，条形基础下桩不超过两排的桩基分别按两种不同的公式进行计算。

1. 大型桩基 P_s 的计算

$$P_s = K q_u A' \quad (4)$$

式中 K ——折减系数；

q_u ——天然地基的极限承载力；

A' ——土对底板的有效支承面积(对中桩所辖底板而言，即图4中阴影部分的面积)。

公式中折减系数 K 的取值影响因素很多，应全面综合考虑。较长桩取小值，较短桩取

大值, 砂性土取大值, 粘性土取小值, 桩距小时取小值, 桩距大时取大值。根据对试验资料进行的分析和参考有关的设计经验^②, 笔者认为对一般考虑桩土共同作用的桩基可取 0.3~0.6。

底板有效支承面积的确定有赖于极限桩距的确定(一般在 $2d \sim 4d$ 的范围以内^[5])。具体确定极限桩距的办法是: ①先将桩基在估计的极限桩距附近选两个不同的桩距, 按整体破坏计算其承载力, 然后折算成效率曲线; ②按交通部规范介绍的高桩刺入破坏效率计算方法, 在估计极限桩距附近的两个不同桩距计算效率, 并将所得的效率曲线也画在同一张图上。两条曲线的交叉点的桩距即为所求的极限桩距。

2. 桩数不超过九根, 条形基础下桩不超过两排的桩基 P_s 的计算

桩数不超过九根, 条形基础下桩不超过两排的桩基极限承载力采用下列两者中较小的值: ①按整体破坏计算的极限承载力; ②相应高桩的极限承载力加上底板面积(扣除桩的面积)乘以 Kq_u , 即:

$$P = P_p + (ab - nA_p)Kq_u \quad (5)$$

式中符号意义同前。 $(ab - nA_p)Kq_u$ 即 P_s 。

(四) 计算结果与试验值的比较

将黄委会山东河务局桩基试验的中桩所辖底板土压力实测值与接近似方法计算的值比较如图 5。

图 6 是计算值与建研院地基所试验(1966)^③及惠特克(Whitaker, 1970)试验值的比较。同样 $L = 48d$ 的低桩, 接近似法计算的值在建研院与惠特克试验值的中间。

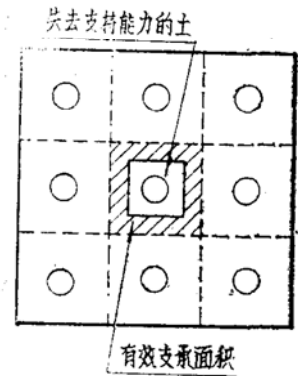


图4 中桩所辖底板的有效支承面积

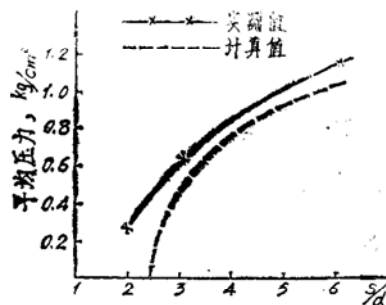


图5 土的支承压力计算值与试验值比较

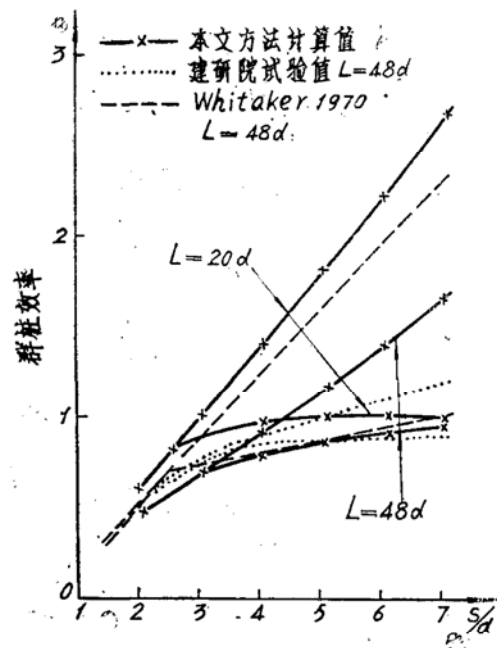


图6 桩基效率计算值与试验值比较

③建研院地基所, 亚粘土中群桩的承载力及变形特性的模型试验, 1966年。

对黄委会山东河务局 $n = 3 \times 3$ 桩基应用近似计算方法计算, 并与实际值对比于表 4。

表 4 各桩组承载力计算值与实测值的比较

桩 距 S	$S = 2d$	$S = 3d$	$S = 4d$	$S = 6d$
相应高桩群实测极限承载力(t)	177	221	174	150
计 算 的 P_s (t)		55	86	196
计算低桩极限承载力 (t)		276	260	346
实测低桩极限承载力 (t)	195	265	286	384

$S = 2d$ 在高桩群整体破坏的极限桩距范围以内。 $S = 3d$ 时计算值大于实测值 4%, 偏于危险。而较大桩距时计算值小于实际值, $S = 6d$ 时小 10%, 若桩距再增大可取更大的 K 值或按式 (2) 计算。

(五)一点说明

某些桩基在工作情况下土对底板没有支承作用, 或支承作用明显下降。但它并不证明在极限荷载情况下土对底板也不起支承作用。同一低桩基础在不同的受荷阶段, 如工作荷载和极限荷载阶段, 其工作性状是不相同的。桩基的荷载试验与桩土长期共同工作的情况也是有差别的。工作过程中桩土所承受的荷载要发生转移, 土对底板的支承压力是要下降的。黄委会山东河务局的长期荷载试验(工作荷载)表明, 在砂性土里, 受荷后一到两个月内支承压力下降明显, 以后逐渐稳定。但在粘性土中的情况当然要复杂得多, 其固结过程可能要延续数年并影响桩土共同作用。而在松砂土中, 桩的打入使松砂挤密, 其承载力比打桩前会有提高, 有利于考虑土的支承作用。

本文关于低桩基础承载力的计算是在试验资料分析的基础上提出来的, 计算结果与实测值接近。基本假设不仅为试验所证实, 而且在理论上也有依据。但这一近似计算方法只能适用于摩擦短桩和桩尖未进入硬层的中长桩(长桩的桩间土得不到充分压缩, 不可能受力)。这一方法忽略了上部结构和底板刚度以及桩土相对刚度对桩土共同作用的影响。这些影响可在折减系数 K 里适当考虑。

五、底板与基土可能脱空的问题

在实际设计中考虑桩土共同作用时所遇到的麻烦是, 低桩基础在工作过程中底板与基土可能发生脱空。在打桩过程中要产生超静孔隙水压力, 使土的结构遭受破坏, 并隆起。超静孔隙水压力的消散要引起土的固结沉降, 桩基在工作期间土要受力, 同样要引起固结沉降。另外土有蠕变作用。所有这些都要使土对底板的支承压力减少并有可能脱空。据报导, 观察挖开的老桩基可看到承台与土面往往脱开。上港二区筒仓进行原体观测^[6]的结果表明, 桩基在最初三年受荷期间, 底板下土的支承压力从 3 t/m^2 逐渐降低到零并脱空。

文献[7]总结了黄河下游桩基开敞式水闸设计和使用的一些情况认为, 经过十年的实践和再认识, 结论是应该适当考虑桩间土直接对底板的支承作用。从豆腐窝和麻湾两闸埋设的土压力盒的应力来看, 土一直承压, 普遍在 $2 \sim 4 \text{ t/m}^2$, 尚未发现有脱空的迹象。

发生脱空的原因与桩的支承情况,土的固结程度和加荷速度,桩的长短等有关。上港二区筒仓桩基入土桩长达30.7m,并打到较硬的褐黄色壤土层。需要指出的是,该桩基在打桩过程中超静孔隙水压力对土体结构的破坏十分严重。土体隆起40~50cm,土体水平位移最大达到40cm,长超过30m的桩基入土后的上抬量也达到12cm^[8]。土在自重作用下固结要引起沉降,引起负摩擦(边载也能引起负摩擦),最后必然脱空。因此,当桩基开始受荷以后,若桩间土在自重作用下的固结尚未完成,则不能考虑桩土共同作用。笔者认为脱空与负摩擦相联系,要避免脱空,就必须消除负摩擦。

考虑桩土共同作用的一般是摩擦短桩,这种桩基在使用中一般不产生负摩擦,荷载加上前已发生的负摩擦在数月后陆续加上外荷载也能将负摩擦消除。

上海桩基础的使用经验和设计方法一文^②指出,软土中桩基受力以后桩土各自分担荷载,由于土的变形使土对底板的支承力和桩上部的摩阻力逐渐向桩下部转移,最终全由某一深度以下一段桩的侧摩阻力及桩尖阻力来支持外荷载。只有当桩尖支承力和桩侧摩阻力全部动员尚不足以承担外荷载时底板和土之间才长期受力。按照这一假设变形理论,桩基开始受力时若桩间土已正常固结,则在受荷过程中不会脱空。只要不脱空,土的支承能力和桩上部的摩阻力一样,当外荷增加时就立即可发挥作用(桩基后期承载力还会有所提高)。当然,在荷载卸空以后,由桩基回弹所引起脱空是正常的。大多数老桩基开挖后看到脱空可能属于这一类型。

要使土对底板起支承作用,应该允许桩基有较大的沉降,只有当桩的刺入量不小于桩尖以上桩间土的压缩量才能达到此目的。另外施工时要减少土体隆起,并控制加荷速度,使桩基开始受力时土已正常固结。

六、结论与建议

- 1.低桩基础的承载力小于相应高桩群和底板单独工作承载力之和。
- 2.长桩、端承桩和桩尖进入硬层的中长桩因桩间土得不到充分压缩,不能考虑土对底板的支承作用。
- 3.在基础宽度较大,入土深度较浅的短桩基础中,土的承载力虽然可以充分发挥,但因桩侧摩阻力降低的成份占整个桩承载力的比例很大,对减少沉降和加大承载力无多大实用价值,在这种情况下应加大桩距,增加桩长。
- 4.普通的摩擦短桩基础一般没有负摩擦。只要打桩时注意减少土体隆起,控制加荷速度,在考虑桩土共同承担外荷载时不必担心底板与基土脱空。但欠固结土中的桩基,及对沉降要求严格控制的建筑物不能考虑桩土共同作用。

本文是在杨克己、王庆辉指导下撰写的,并得到唐念慈、俞仲泉的指导和黄委会山东河务局、建研院地基所的大力支持,谨表感谢。

参 考 文 献

- [1] Australian Standard, Rules for the Design and Installation of Piling, (AS2159—1978) Published by the Standard Association of Australia.
- [2] Ottaviani, M., Three-dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups, Geotechnique, June, 1975.

- [3] Palka, J. and Naborczyk, 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), 1980。
- [4] 国家基本建设委员会建筑科学研究院主编, 工业与民用建筑地基基础设计规范, (TJ 7—74 试行) 中国建筑工业出版社, 北京, 1974年。
- [5] 杨克己、王惠初、苏耀祥、王福元, 群桩承载力的研究, 华东水利学院学报, 1981年第3期。
- [6] 陈绪录, 群桩基础原体观测——上港二区散粮筒仓原体观测初步报告, 南京水利科学研究所, 1979年。
- [7] 牟玉玮、龙于江、王明广, 对桩基开敞式水闸设计有关问题的初步分析, 人民黄河, 1979年第3期。

Vertical Bearing Capacity of Piles with the Spot Footing

Zhou Fu-tian

(Nanjing College of Maritime Transportation Engineering)

Abstract

The vertical bearing capacity of piles with spot footing in nature is a problem of undertaking the load action by piles in cooperation with soil. The value of the load directly undertaken by the soil depends upon the pile depth, pile spacing and physical and mechanical properties of the soil. Based on the data obtained from field tests, in this paper author analyses the bearing capacity of piles in cooperation with soil, proposes a simple practical approximate method of calculation, and discusses the problem of separation of soil from spot footing in their working process.