

水泥土桩长等对承载力及模量影响的定量分析

Quantitative analyses of the influence of pile length and other factors
on capability and modul of cement stabilized soil composite foundation

马海龙, 陈云敏

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了研究软土中水泥土群桩的工作性能和承载力等问题, 进行了系统的现场足尺试验。通过埋设测试元件对承台土反力、桩身轴力及复合地基变形等进行了量测。根据部分试验结果系统地分析了单桩、四桩、九桩情况下, 桩长、置换率、桩数等关键参数对复合地基的承载力及变形模量的影响。

关键词: 水泥土桩; 四桩群桩; 九桩群桩; 承载力; 复合变形模量

中图分类号: TU 471.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)06-0720-04

作者简介: 马海龙(1964-), 男, 安徽霍邱人, 在站博士后, 副教授, 从事岩土工程的教学与研究工作。

MA Hai-long, CHEN Yun-min

(Civil Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The systematic full scale tests in situ were carried out to determine the behaviour, function and bearing capacity of cement stabilized soil pile composite foundation in soft soil. The pressure under cap, axis force along pile and deformation of foundation were obtained from these tests. The bearing capacity and deformation of four-pile and nine-pile composite foundation were systematically analyzed based on part of the test results. The influences of length, spacing and number at pile on bearing capacity and deformation module of cement stabilized soil pile composite foundation are studied.

Key words: cement stabilized soil pile; pile group; bearing capacity; composite foundation; deformation module

0 前言*

桩长及置换率是影响水泥土桩承载力及变形问题的重要因素, 一直吸引着国内外学者对它们进行深入的研究, 即使是小掺入量的情况^[1]。不过对水泥土桩的研究往往偏多于单桩或带台单桩的研究^[2,3], 在多桩情况下, 系统地研究桩长、置换率、桩数等对承载力及变形的定量影响的报道很少。现有地基规范^[4]对水泥土系桩体的复合地基承载力的获得, 一是通过经验参数法, 二是通过带台单桩的静载荷试验。因带台单桩和群桩的工作情况不同, 正如熟知刚性桩群桩存在群桩效应一样, 水泥土桩群桩也可能存在群桩效应。由于水泥土桩的承载力过多地依赖于地基土, 水泥土桩的群桩效应可能还要显著于刚性桩的情况, 这方面的报道也较少。鉴于目前研究情况, 本文基于系统的原位试验结果, 详细地分析了桩长、置换率、桩数等关键参数对水泥土桩复合地基承载力及变形模量等的影响。

1 试验概述

1.1 试验场地土层情况

群桩试验场地位于江苏省常熟市湖苑四区拟建区内。试验场地为长方形, 东西向长约 200 m, 南北向宽

约 30 m。试验桩就打设在该范围内。

因为荷载板宽度 2 倍深度内土体的平均性质对载荷试验结果影响较大, 为了消除地表硬壳层的存在对载荷结果的影响, 本次试验前, 用挖掘机已将地表的杂填土及粉质黏土层挖除。

地层的物理力学指标见表 1。

1.2 试验内容

试验内容包括:

(1) 天然地基(1 组)

(2) 单桩(6 组)

单桩试验: 三组改变桩长。

单桩复合地基试验: 三组改变桩长(承台板尺寸不变)。

(3) 群桩(10 组)

四桩复合地基试验: 三组改变桩间距(改变承台板尺寸, 桩长不变), 三组改变桩长(承台板尺寸不变)。

九桩复合地基试验: 三组改变桩间距(改变承台板尺寸, 桩长不变), 三组改变桩长(承台板尺寸不变)。

试验桩体的编号见表 2。采用 425[#] 普通硅酸盐水泥, 水泥掺入量为 15%。桩径为 0.25 m, 桩长分别为 3、5 及 7 m。水泥土桩采用深层搅拌法施工。

* 基金项目: 江苏省社会发展项目(BS99425)

收稿日期: 2003-01-06

表 1 地层特性表
Table 1 Soil parameters

层序	地层名称	厚度 /m	状态	含水率 /%	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比	塑性指数 /%	液性指数	压缩系数 / MPa^{-1}	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	承载力标准值 /kPa
1	杂填土	0.80~ 1.40											
2	粉质黏土	0.90	可塑软塑	42.0	17.25	1.140	18.7	0.83	0.720	2.97	20.0	2.1	80
3- 1	淤泥质粉质黏土	4.70~ 10.45	流塑	45.4	17.49	1.274	16.5	1.57	1.009	2.46	7.7	8.5	60
3- 2	淤泥质粉质黏土夹粉土	3.75~ 11.15	流塑	35.1	18.27	1.010	10.3	1.60	0.458	4.28	5.9	18.5	75
3- 3	粉土	1.40	稍密	32.4	18.73	0.916	8.6	1.51	0.311	6.15			120
4	粉质黏土	1.00~ 3.30	可塑	30.7	19.19	0.869	19.2	0.49	0.208	9.26	36.3	5.6	160
5	粉质黏土夹粉土	1.80~ 5.05		27.5	18.91	0.836	11.6	0.77	0.331	6.16	15.2	13.7	130
6	粉土夹砂	2.00~ 4.00	软塑	27.5	18.48	0.849	9.7	0.86	0.122	15.21	16.5	20.0	110
7	粉砂	> 2.30	稍密	33.7	18.58	0.908			0.118	16.50	5.8	22.2	140

表 2 天然地基与桩的统一编号
Table 2 Numeration of the nature soil and piles

序号	名称	类型	编号	置换率/%
1	天然地基	承台 0.85 m×0.85 m	Trdj	
		$l = 3\text{ m}$	P3	
2	单桩	桩	$l = 5\text{ m}$	P5
			$l = 7\text{ m}$	P7
3	单桩承台	承台 0.85 m×0.85 m	$l = 3\text{ m}$	1pc8503 6.8
			$l = 5\text{ m}$	1pc8505 6.8
			$l = 7\text{ m}$	1pc8507 6.8
4	4 桩承台	承台 1 m×1 m	$l = 3\text{ m}$	4pc1003 19.6
			$l = 5\text{ m}$	4pc1005 19.6
			$l = 7\text{ m}$	4pc1007 19.6
		0.85 m×0.85 m	$l = 5\text{ m}$	4pc8505 27.2
		1.20 m×1.20 m	$l = 5\text{ m}$	4pc1205 13.6
5	9 桩承台	承台 1.5 m×1.5 m	$l = 3\text{ m}$	9pc1503 19.6
			$l = 5\text{ m}$	9pc1505 19.6
			$l = 7\text{ m}$	9pc1507 19.6
		1.2 m×1.2 m	$l = 5\text{ m}$	9pc1205 27.2
		1.8 m×1.8 m	$l = 5\text{ m}$	9pc1805 13.6

注: 1. 静载荷试验用两套桩架进行, 委托同济大学沪西校区岩土所进行桩的慢速维持荷载的试验。2. 静载荷试验板采用钢板加工而成。1.2 m 宽以上钢板采用加肋钢板, 确保钢板无挠度。

1.3 量测元件种类及设置

- 共埋设以下量测元件:
- (1) 在打设的桩体内设置应变计, 应变计在桩顶下 50 cm 处向下每隔 1 m 设置。
- (2) 在桩间土内设置分层沉降标, 沉降感应磁环在承台板下 50 cm 处向下每隔 1 m 设置, 最下面一个磁环在桩尖下 1 倍桩长的深度土内。
- (3) 在载荷板下设置土压力盒。桩顶设置 1.0 MPa 的应变式土压力盒, 桩间土设置 0.2 MPa 的应变式土压力盒。

试验方法采用静力载荷法(慢速维持法)进行单桩及群桩的原位试验。静载荷试验在成桩后 28 d 进行。

2 试验成果分析

本次复合地基试验结果表明, 水泥土桩复合地基静载 $p-s$ 曲线多无明显拐点, 为利于分析及统一对比, 对单桩复合地基及多桩复合地基的承载力确定, 均采用变形为 $s = 0.02b$ (b 为承台板宽度) 时所对应的荷载作为分析用承载力。

2.1 桩长对承载力的影响

众所周知, 水泥土桩复合地基承载力随桩长的增加而增长。那么承载力的增长是不是与桩长的增长而线性增加呢? 由图 1 看出(四桩群桩、九桩群桩的桩体置换率均为 19.6%), 对四桩群桩而言, 桩长从 $l = 0\text{ m}$ (对应于天然地基), 增加到 $l = 3\text{ m}$, 承载力的增长较快, 承载力增长幅度约为 83%。桩长从 3 m 增加到 5 m 时, 承载力的增长幅度约为 14%, 而桩长由 5 m 增加到 7 m 时, 其承载力的增加幅度更小, 约为 8%。对九桩群桩而言, 桩长从 0 m 增加到 3 m 时, 承载力增长幅度约为 63%, 桩长从 3 m 增加到 5 m 时, 承载力的增长幅度约为 10%。从以上分析知, 当水泥土桩的桩长达到一定长度后, 再增加桩长不能显著增加复合地基的承载力。对这里的四桩和九桩复合地基而言, 显著提高承载力的桩长约为 $12d$ (d 为桩的直径)。

2.2 置换率对承载力的影响

置换率反映了单位面积土体内桩体的多少, 桩间距越小, 置换率越大。图 2 示出了四桩、九桩情况时, 桩长一定(桩长 5 m), 置换率对承载力的影响。对四桩情况, 置换率从 0(对应于天然地基)到 13.6%, 承载力增幅为 75%, 置换率从 13.6% 增加到 19.6% 时, 承

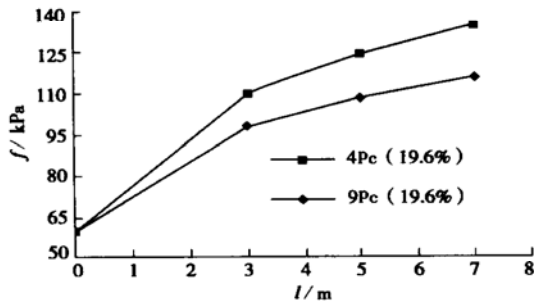


图1 桩长对承载力的影响

Fig. 1 Influence of pile length on bearing capacity

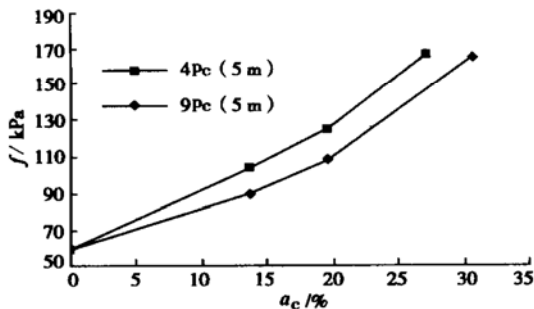


图2 置换率对承载力的影响

Fig. 2 Influence of pile spacing on bearing capacity

承载力增长 19%, 置换率从 19.6% 增加到 27.2% 时, 承载力增长 33%。对九桩情况, 置换率从 0 到 13.6%, 承载力增幅为 50%, 置换率从 13.6% 增加到 19.6% 时, 承载力增长 20%, 置换率从 19.6% 增加到 30.7% 时, 承载力增长 52%。由此可见, 无论是四桩复合地基, 还是九桩复合地基, 均呈现了承载力随置换率的增大而增长的趋势。因此增大置换率是提高复合地基承载力的有效途径。

2.3 桩长对复合变形模量的影响

复合地基的复合变形模量按下式反算:

$$E_0 = \omega(1 - \mu^2) \frac{pb}{s},$$

式中 b 为荷载板宽度; $s = 0.01b$; p 为在复合地基 $p-s$ 曲线上, 与沉降 s 相对应的荷载; ω 为荷载板形状系数, 方形板取 0.88; μ 为土的泊松比, 这里取 0.42。

置换率为 19.6% 时, 桩长分别为 3, 5, 7 m 情况下, 四桩群桩、九桩群桩复合地基的反算复合地基变形模量示于图 3。桩长为零时的变形模量即为天然地基的变形模量。对四桩情况, 桩长从 0 m 增加到 3 m 时, 变形模量增幅 130%, 桩长从 3 m 增加到 5 m 时, 变形模量增幅为 28%, 桩长从 5 m 增加到 7 m 时, 变形模量增幅为 15%。从图 3 看出, 九桩群桩的复合变形模量也有同样的规律。表明, 复合地基变形模量随桩长增加而增加, 但超过一定桩长后 (12 d), 变形模量增加较慢。另外, 笔者曾对常熟市许浦闸闸底板地基采用水泥土搅拌桩处理进行研究。通过水泥土桩体钻芯取样

发现, 尽管成桩已有 90 d 左右, 深处芯样 (约 17 m 深) 却呈软化状态, 桩体强度较小。在地面放置几天、风吹日晒后, 桩体逐渐变硬, 强度随之提高。不知这种深层水泥土软化现象是否普遍, 如果确实如此, 通过增加水泥土桩长来控制沉降的说法, 有待进一步验证。由于深处水泥土桩体强度在自然状态下较低, 能否通过掺加添加剂使深处水泥土硬化, 是值得研究的问题。

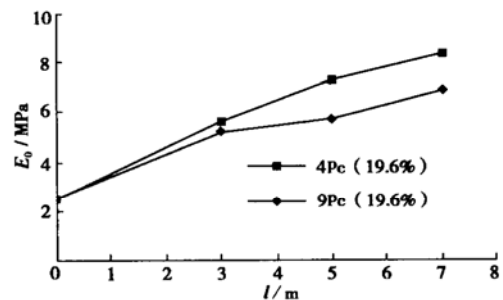


图3 桩长对复合模量的影响

Fig. 3 Influence of pile length on composite modul

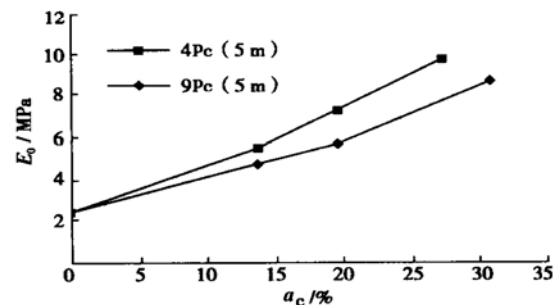


图4 置换率对复合模量的影响

Fig. 4 Influence of pile spacing on composite modul

2.4 置换率对复合变形模量的影响

图 4 是四桩复合地基及九桩复合地基情况下, 桩长一定 (5 m), 改变置换率与获得的复合地基变形模量的关系。对九桩群桩而言, 置换率从 0 增加到 13.6%, 变形模量增幅为 92%, 置换率从 13.6% 增加到 19.6%, 变形模量增幅为 33%, 置换率从 19.6% 增加到 30.7%, 变形模量增幅为 22%。图 4 看出, 四桩群桩也有同样的规律。因此, 复合地基的复合变形模量随置换率的提高而增大。比较图 3 知, 提高置换率获得的变形模量的增加, 比增加桩长获得的变形模量的提高来得快。

2.5 桩数对承载力的影响

相等的条件下 ($l = 5 \text{ m}$, $a_c = 6.8\%$, 其中, 单桩复合地基直接获得, 四桩、九桩按试验值反算获得), 从图 5 的趋势看出, 随桩数的增加, 复合地基的承载力在减小。这说明, 对于水泥土桩来说, 同样存在群桩效应, 即群桩承载力小于单桩承载力之和。桩数由 1 增加到 4, 其承载力的下降系数约为 0.835。桩数由 4 增

加到9时,其承载力的下降系数约为0.934。这里看出,由1根增加到4根,虽然只增加了3根,但承载力下降幅度较大。由4根增加到9根,虽然增加了5根,其承载力下降幅度却小了。表明四桩群桩复合地基的承载力与九桩群桩复合地基的承载力相比,减小的幅度已经不是太大了。或许九桩群桩复合地基承载力基本上能代表九桩以上群桩的承载力,这需要更多的试验来验证。

目前,采用单桩(带板)复合地基(改变板的大小来获得相应置换率)的静力载荷试验,能否真实代表群桩的工作性态,是值得探讨的。由上述试验分析知,单桩带板静载荷试验获得的复合地基承载力不能代表群桩复合地基的承载力,它不能反映群桩效应,从而导致了获得较高的承载力,这对复合地基强度安全储备是不利的。其较大的隐患可能是,往往会导致过大沉降的发生。

为了在计算时充分考虑由于群桩效应而导致的复合地基承载力的降低,在采用单桩复合地基静载荷试验确定复合地基承载力标准值时,应予以折减。从本次试验的结果分析来看,考虑群桩效应后,两次下降系数相乘后(从1桩到4桩,再由4桩到9桩)得群桩承载力下降系数约为0.8。也就是说,在桩长相同、置换率相同的条件下,群桩复合地基的承载力约为单桩复合地基承载力的0.8倍。这一结论有待于进一步试验验证,但至少初步揭示了不能用单桩复合地基静载荷试验获得的承载力来代表设计用复合地基承载力。

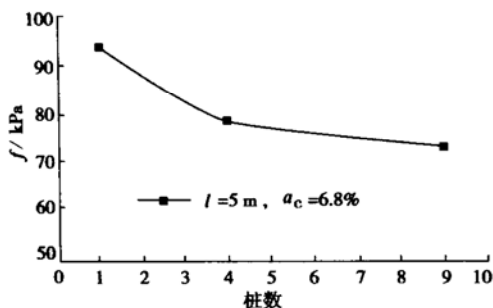


图5 桩数对承载力的影响

Fig. 5 Influence of pile number on bearing capacity

2.6 桩数对变形模量的影响

在桩长相同、置换率相同的条件下,桩的数量对复

合地基的变形模量有一定影响。图6给出了变形模量与桩数的关系曲线。可以看出,随着桩数的增加变形模量在减小。四桩以后,变形模量随桩数增加而减小的幅度不再显著。

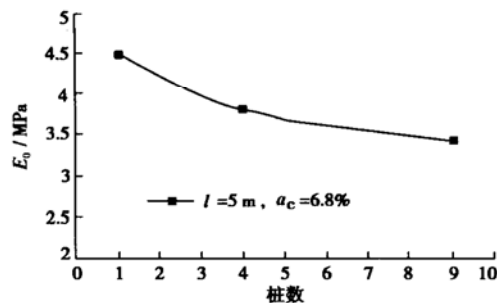


图6 桩数对复合模量的影响

Fig. 6 Influence of pile number on module

3 结 语

(1) 当水泥土桩的桩长达到一定长度后,再增加桩长不能显著提高复合地基的承载力。对这里的四桩和九桩复合地基而言,显著提供承载力的桩长约为 $12d$ (d 为桩的直径)。

(2) 增大置换率是提高复合地基承载力的有效途径。对四桩和九桩复合地基,总体上,当置换率 $\geq 13.6\%$,置换率每增大5%,承载力约提高15%左右。

(3) 提高置换率获得的复合地基变形模量的增加,比增加桩长获得的变形模量的增加来得快。

(4) 本次试验揭示,九桩群桩复合地基的承载力约为单桩复合地基承载力的0.8倍。

参考文献:

- [1] Kasam K, Ochiai H, Yasufyku N. Experimental and theoretical study on mechanical properties of lightly cemented clay [A]. Recent Development of Theory & Practice in Geotechnolgy [C]. 1997. 81- 86.
- [2] 罗惟德. 单桩承载力机理分析与载荷—沉降曲线的理论推导 [J]. 岩土工程学报. 1990, 12(1): 35- 44.
- [3] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 1- 8.
- [4] DGJ 08—11—1999, 地基基础设计规范 [S].