

文章编号: 1001-1986(2008)02-0032-04

深厚软土中长短桩复合地基试验

张可能¹, 杨庆光¹, 刘杰²

(1. 中南大学地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南工业大学岩土工程研究所, 湖南 株洲 412008)

摘要: 为了研究水泥土长短桩复合地基在深厚软土的加固效果及其承载特性, 实测了长桩、短桩和桩间土顶面应力, 探讨了这种复合地基桩土应力比及其变化规律。研究表明, 长桩和短桩桩土应力比均表现为先增大, 后减小, 再趋于稳定的趋势, 并在临界荷载 P_c 前后, 复合地基主次桩顺序发生变化。得出考虑荷载水平的水泥土长短桩复合地基承载力计算公式及桩土承载力发挥系数取值方法。结果表明: β 取值范围在 0.778~0.838, β_2 的取值范围为 0.945~0.971, 并且建议取 s/b 比值为 0.00148~0.00204 对应的承载力为长短桩复合地基承载力特征值。

关 键 词: 水泥土桩; 长短桩; 复合地基; 承载特性; 载荷试验

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A

Experimental study of long-short piles composite foundation in deep soft soils

ZHANG Ke-neng¹ YANG Qing-guang¹ LIU Jie²

(1. Department of Geosciences and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: For researching reinforcement effect and bearing characteristics of long-short cement-soil piles composite foundation in deep soft soils, the test in situ on the bearing characteristics of long-short cement-soil piles composite ground in deep soft soils are carried out. The stresses of long piles, short piles and soil are measured; and pile-soil stress ratio of composite ground with cement-soil long-short piles and its variation with the load in deep soils are also studied. According to pile-soil stress ratio, it has been found that stress ratio increases at first and then decreases and finally tend to stability. It is revealed that the sequence of primary piles and secondary pile are changed after reaching critical load P_c . Based on the result of static load test, computational formulas for bearing capacity characteristic value and bearing capacity coefficient of cement-soil long-short piles composite foundation which have thought of load level are developed in this paper. Result indicates that the value of β ranges 0.778~0.838, β_2 is 0.945~0.971. It is suggested that when s/b is 0.00148~0.00204 the value of bearing capacity is bearing capacity characteristics of cement-soil long-short piles composite foundation.

Key words: cement-soil pile; long-short piles; composite foundation; bearing characteristics; static load test

沿海地区广泛分布深厚软土, 在这种软土中进行工程建设必须先对其进行处理。文献[1-2]采用真空联合堆载预压技术对深厚软土进行处理, 从加固前后原位测试以及土工试验数据的对比表明, 加固效果明显; 文献[3]采用低强度桩对深厚软土路基进行试验, 研究表明复合地基的主要压缩量发生在加固区底面的一定范围土体内; 文献[4-5]通过大型现场试验, 对刚-柔性桩复合地基处理深厚软土地基承载机理进行了研究, 表明此类复合地基合理地发挥

了它们各自的承载能力。由于真空预压和堆载预压地基处理方法处理深厚软土地基, 受到处理深度和工期两方面因素的制约, 工程竣工后仍然存在较大的工后沉降。采用刚性桩或刚-柔性桩复合地基处理方法时, 虽然刚性桩施工简便, 工期短, 但是由于广东沿海地区软土层厚度大, 刚性桩要穿过软土层所需要桩长较长, 导致工程造价成倍提高。虽然现有的理论和试验结果表明^[6-9], 当水泥土复合地基桩长超过一定值后, 其对提高地基承载力的作用甚微,

但是同真空预压和堆载预压处理方法相比，水泥土处理方法工期短；而且同刚性和刚-柔性桩处理方法相比，其处理费用低。因此，本文提出采用水泥土长短桩对深厚软土进行处理的方法，短桩主要起加固浅层土体，提高地基承载力，减少加固区沉降量作用，而长桩加固区主要旨在减小部分下卧层沉降量。这种水泥土长短桩处理软土路基的方法，既可满足承载力要求，又适当地降低了工后沉降，缩短工期，符合广东地区经济发展对公路建设提出的要求。

1 试验概况

1.1 试验场地工程地质条件

试验场地选择在广州南沙汽配工业园。根据试验要求，本试验选择23号路的K0+170—K0+200路段为试验段。试验场地土层的物理力学性质指标如表1所示。

表1 土层物理力学性能指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soils

层号	土层	层厚 h/m	含水量 w/%	重度 $\gamma/\text{k}\cdot\text{Nm}^{-3}$	孔隙比 e
1	淤泥	20.7	65.6	15.0	1.904
2	亚粘土	2.2	54.3	16.7	1.430
层号	土层	压缩模量 E/MPa	压缩系数 a/MPa^{-1}	内摩擦角 $\phi/(\circ)$	粘聚力 c/kPa
1	淤泥	1.64	1.767	8.2	6.5
2	亚粘土	2.62	0.929	12.8	8.2

1.2 试验方案

根据表1中提供的软土物理力学性能指标，并利用文献[8]中推导所得水泥土桩有效桩长计算方法，可以粗略估计出试验点地层中水泥土搅拌桩复合地基的有效桩长为10~12m。因此本次最后采取3组4桩组成的长短搅拌桩复合地基大型现场载荷试验，旨在对长短搅拌桩处理深厚软土效果进行检测，并提出合理的承载力计算方法。此外还进行了2组单桩复合地基载荷试验，1组单桩抗压，1组天然地基和1组合桩间土地基载荷试验。采用水泥干喷方法成桩，桩径500mm，长短桩按照正方形布置，桩间距1.5m，水泥掺量为50kg/m。试验中复合地基铺设了15cm厚的中砂垫层，并采用慢速维载法进行载荷试验。此外，为了研究长短桩复合地基中长桩、短桩及桩间土之间的荷载分配规律，在长桩、短桩及桩间土顶面分别布置了土压力盒，其中桩顶布置4个，桩周土布置7个，具体桩位布置和土压力盒布置如图1所示(单位：mm)。

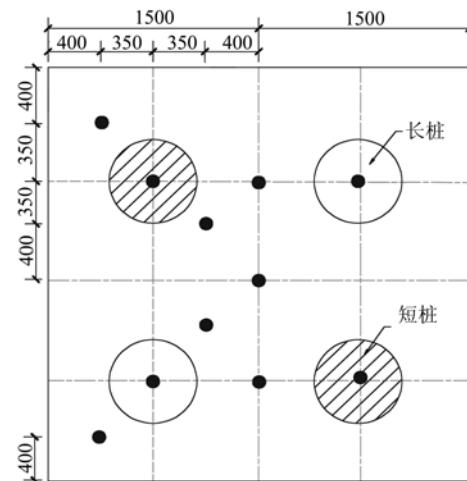


图1 土压力盒布置图
Fig.1 Arrangement of pressure cells

2 试验结果

2.1 荷载沉降曲线及承载力取值

图2和图3分别给出了12m长水泥土桩单桩抗压和加固前后地基承载力荷载沉降曲线。从图中可以很明显的看出，单桩抗压荷载达到225kN以后，沉降量急剧增大。根据JGJ94-94《建筑桩基技术规范》^[10]规定，单桩极限承载力为225kN。从图3可知

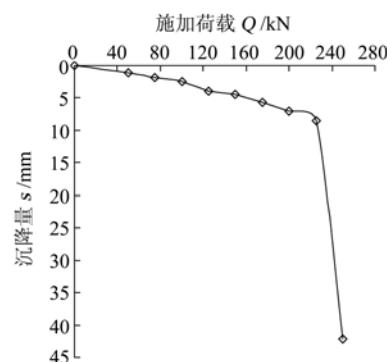


图2 单桩抗压载荷试验曲线图

Fig.2 Static loading test curve of single pile

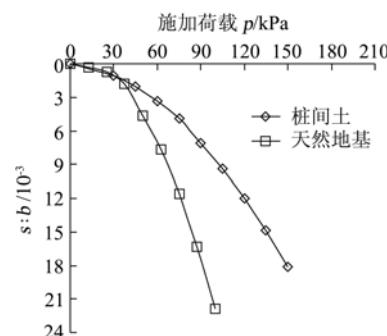


图3 加固前后地基土载荷试验曲线

Fig.3 Static loading test curves of ground before and after reinforcing

以明显看出，加固前后的地基土承载力发生了较大幅度的提高，这主要是两方面的因素所导致的。一方面由于采用了干法施工，在含水量达到 65.6% 的淤泥中，水泥水化吸水，土体含水量降低，从而地基承载力得到一定提高；另一方面桩间土体受到桩体侧向限制，桩间土体的侧向位移要比天然地基明显减小，桩间土体承载力得到了较大的提高。

图 4 为复合地基承载力曲线图，从曲线可以看出，复合地基承载力曲线都比较平缓，没有出现明显的拐点。对于单一桩型复合地基，JGJ79-2002《建筑地基处理技术规范》^[11]中建议搅拌桩复合地基承载力取值宜采用 $s/b = 0.006$ 所对应的承载力值作为承载力特征值，(s 为复合地基沉降量，m; b 为载荷板边长，m)，而文献[12]建议柔性桩承载力特征值宜取 $s/b = 0.01$ 所对应的承载力。实际上，简单地凭经验确定 s/b 的比值来求单一桩型复合地基承载力特征值有可能并不准确，因为承载力特征值取值是一个范围。当复合地基的 s/b 取定之后，有可能当复合地基产生 s 的沉降量时，桩顶沉降量将超过单桩抗压极限荷载所对应的沉降量。因此，在确定 s/b 的时候应该综合考虑单桩，单桩复合地基和桩间土体的变形协调关系。

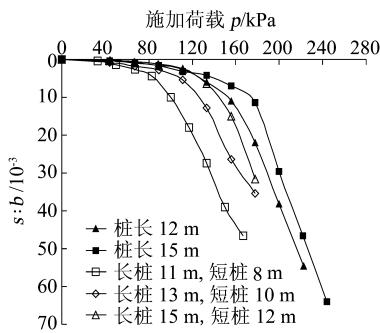


图 4 复合地基载荷试验曲线

Fig.4 Static loading test curves of composite foundation

假定垫层为弹性体，弹性模量为 E_c ，厚度为 h_c ，桩土顶面土压力盒实测应力分别为 σ_p 、 σ_s ，可以得到桩顶和土顶的垫层压缩量分别为 Δh_p 、 Δh_s ：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta h_p = \frac{\sigma_p}{E_c} h_c \\ \Delta h_s = \frac{\sigma_s}{E_c} h_c \end{array} \right. . \quad (1)$$

那么，当单一桩型复合地基产生 s 沉降量的时候，桩顶和土顶所对应的沉降量分别为：

$$\left\{ \begin{array}{l} s_p = s - \Delta h_p = s - \frac{\sigma_p}{E_c} h_c \\ s_s = s - \Delta h_s = s - \frac{\sigma_s}{E_c} h_c \end{array} \right. . \quad (2)$$

根据 s 、 s_p 和 s_s 的取值，并结合单桩抗压、桩间土和单一桩型复合地基的荷载–沉降曲线，可以分别得到对应沉降量下的承载力特征值 $f_{sp,k}$ 、 R_p/A_p 和 f_{sk} ，并利用下式，就可以得到桩间土承载力发挥系数 β 的取值。

$$\beta = \frac{f_{sp,k} - mR_p / A_p}{(1-m)f_{sk}} , \quad (3)$$

其中 f_{sk} 和 β 为桩间土承载力特征值和发挥系数； R_p 和 A_p 为单桩承载力特征值和桩身截面积； $f_{sp,k}$ 为复合地基承载力特征值； m 为面积置换率。

根据上文的方法，取复合地基 s/b 为 0.006 ~ 0.01， $h=15$ cm， $E_c=50$ MPa，进行计算，发现当 $s/b > 0.0075$ 以后，单桩承载力取值将超过极限荷载 225 kN，因此，本文建议 s/b 的取值范围为 0.006 ~ 0.0075 对应的桩间土承载力发挥系数 β 如表 2 所示。对于 f_{sk} 的取值，规范^[11]中建议，当无桩间土承载力特征值的经验值，可以按照天然地基承载力特征值进行取值，但是从加固前后天然地基和桩间土地基承载力特征值取值可以发现，当采用桩间土承载力特征值的时候， β 值一般小于 1，本文中取值范围为 0.778 ~ 0.838；而当采用天然地基承载力特征值的时候，由于多方面因素的影响，桩间土承载力发挥系数 β 变为天然地基承载力发挥系数 β_1 ，而 β_1 的取值范围为 1.207 ~ 1.267，两个发挥系数是有很大差别的。因此，选择不同的 f_{sk} ，必须选择对应的承载力发挥系数。

表 2 单桩复合地基桩间土承载力发挥系数 β_1
Table 2 Bearing capacity coefficient β_1 of soil in single pile composite foundation

序号	s/b	单桩复合地基 $f_{sp,k}/kPa$	桩体 $R_p/A_p/kPa$	桩间土 f_{sk}/kPa	天然地基 f_{sk}/kPa	m	β	β_1
1	0.006	132.69	676.13	96.43	64.12	0.09	0.838	1.267
2	0.0065	135.37	689.77	102.11	66.94	0.09	0.807	1.231
3	0.007	138.21	704.26	106.68	69.13	0.09	0.789	1.217
4	0.0075	141.32	720.08	110.60	71.24	0.09	0.778	1.207

2.2 水泥土长短桩荷载分担比

把3组长短桩复合地基载荷试验中2根长桩和2根短桩,以及桩间土顶的土压盒读数分别进行平均,并把平均后的结果同加载总荷相比,即为长桩、短桩和桩间土的荷载分担比。图5即为长短桩复合地基在不同荷载下桩土荷载分担比随荷载变化曲线。从图中可以看出,长短桩桩体荷载分担比曲线都表现为先增大,后减小的趋势;而桩间土则表现为先减小后增大的趋势。曲线走向说明,在荷载初期,桩间土起主要作用,随着荷载的增大,上部荷载逐渐向水泥土桩转移。当荷载达到一定大小后,水泥土桩首先发生破坏,承载力下降,从而桩顶荷载又重新向桩间土转移。此外,从曲线还可看出,加载初期,长桩的荷载分担比要比短桩小,短桩起主要作用。当荷载继续增大,并达到某个临界值后,长桩荷载分担比超过短桩,并成为主要承载桩。

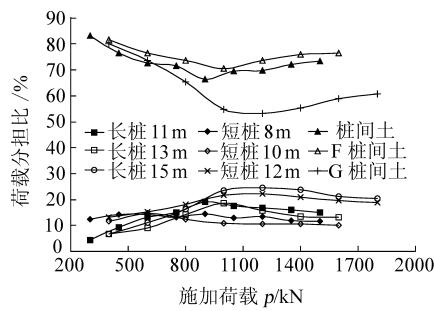


图5 长短桩复合地基荷载分担比曲线

Fig.5 Pile-soil load distribute ratio of long-short-pile composite foundation

2.3 水泥土长短桩桩土应力比

图6为3组长短桩复合地基长桩与短桩桩土应力比随荷载增加而变化曲线图。从图中可以看出长短桩桩土应力比均表现为先增大,后减小,再趋于稳定的趋势。但是长短桩桩土应力比的极值点并没有在同一级荷载下达到,而是短桩的桩土应力比先达到最大值。随着荷载继续增大,短桩桩土应力比

开始下降,而长桩桩土应力比继续提高到最大值后也开始下降,最后长短桩桩土应力比趋于稳定。从桩土应力比曲线可以看出,长桩和短桩的桩土应力比会出现一个交点,3组试验中交点出现的位置对应的荷载为640.0 kN、748.3 kN和875.3 kN。此外,在荷载施加初期,短桩的桩土应力比要比长桩大,此时短桩承担的荷载要比长桩多,短桩为主桩,长桩为次桩。假如把长短桩桩土应力比相等时上部荷载定义为临界荷载 P_c ,那么当荷载达到 P_c 后,长桩桩土应力比超越短桩,此时主次桩的顺序发生变化,长桩为主桩,短桩为次桩。

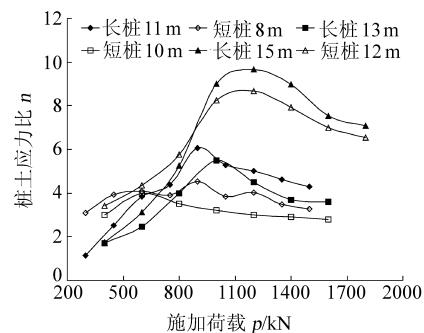


图6 长短桩复合地基桩土应力比曲线

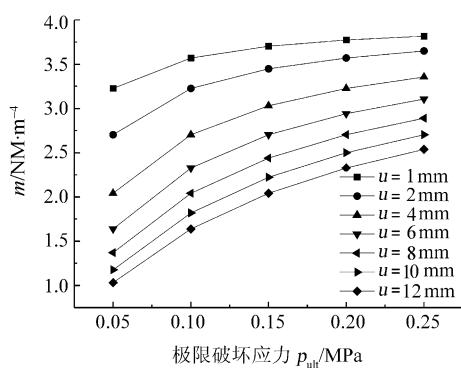
Fig.6 Pile-soil stress ratio of long-short-pile composite foundation

2.4 长短桩复合地基承载力确定方法

长短桩复合地基中次桩的单桩复合地基看成其主桩的桩间土,通过次桩单桩复合地基和主桩的平均应力,利用公式(1),可以得到次桩单桩复合地基和主桩顶部垫层的压缩量。再根据长短桩复合地基的沉降量,通过公式(2)就可以得到长短桩复合地基中次桩单桩复合地基和主桩的沉降量。最后根据长短桩复合地基和次桩单桩复合地基的载荷试验曲线,利用公式(3),即可得到等效桩间土承载力发挥系数 β_2 的取值大小。同时,根据长短桩复合地基承载力取值范围,可以得到长短桩复合地基对应的 s/b 取值范围。

表3 长短桩复合地基桩间土承载力发挥系数 β_2
Table 3 Bearing capacity coefficient β_2

序号	单桩复合地基 s/b	单桩复合地基 $f_{sp,k}/kPa$	长短桩复合地基 s/b	长短桩复合地基 $f_{sp,k}/kPa$	水泥土桩 $R_p/A_p/kPa$	桩间土 f_{sk}/kPa	m	β_2
1	0.006	132.69	0.00148	123.69	676.13	96.43	0.043	0.949
2	0.0065	135.37	0.00153	124.87	689.77	102.11	0.043	0.945
3	0.007	138.21	0.00166	127.21	704.26	106.68	0.043	0.960
4	0.0075	141.32	0.00204	131.82	720.08	110.60	0.043	0.971

图 6 $m-p_{\text{ult}}$ 关系Fig.6 The relationship of $m-p_{\text{ult}}$ curve

参考文献

- [1] 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 23~25.
- [2] 姜志强, 孙树林, 李磊. 基坑开挖中土压力计算模型探讨[J]. 河海大学学报, 2003, 31(3): 303~306.
- [3] 张文慧, 田军. 基坑围护结构上的土压力与土体位移关系分析[J]. 河海大学学报, 2005, 31(5): 575~579.

(上接第35页)

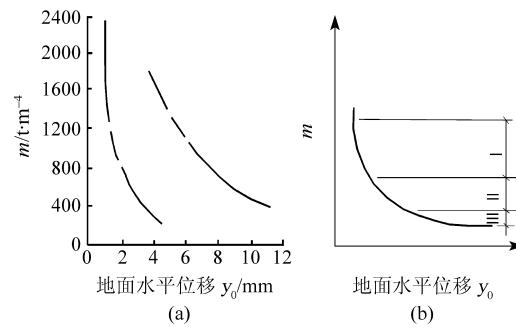
对于短桩为12m, 长桩为15m的长短桩复合地基, 当 $s/b=0.006$ 时, 承载力特征值131.7kPa, 超过了875.3kN临界荷载所对应的应力值, 因此, 可以把12m单桩复合地基等效为15m桩的桩间土考虑。利用上面的方法, 可以求出等效桩间土承载力发挥系数 β_2 的取值范围为0.945~0.971, 而对应的 s/b 取值范围为0.00148~0.00204, 具体计算结果如表3所示。从长短桩复合地基 s/b 的取值范围可以看出, 规范^[11]中取 $s/b=0.006$ 对应的承载力为复合地基承载力特征值的取值方法, 其实是针对单一桩型复合地基而言, 对于水泥土长短桩复合地基的承载力取值, 本文建议取 $s/b=0.00148\sim0.00204$ 对应的承载力为长短桩复合地基承载力特征值。

3 结论

a. 从载荷试验荷载沉降曲线可以看出, 水泥土长短桩复合地基荷载沉降曲线同被加固地基土和单桩复合地基承载曲线一样也表现为缓变型。

b. 长短桩复合地基桩土应力比表现为先增大, 后减小, 再趋于稳定的趋势, 并且桩土应力比极值在不同的荷载下达到。加载初期, 短桩为主桩, 长桩为次桩, 随着荷载的继续施加, 主次桩次序出现颠倒现象。

c. 基于桩、土、复合地基沉降量的协调关系, 得到了单桩复合地基和长短桩复合地基承载力特征值的取值方法, 并依此推导出了桩间土和等效桩间土承载力发挥系数取值范围和长短桩复合地基承载

图 7 $m-y_0$ 关系图Fig.7 The relationship of $m-y_0$ curve
a—实测结果; b—理论分析

- [4] 李蓓, 赵锡宏. 一种考虑挡土墙变形的深基坑非线性土压力方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 453~458.
- [5] 邓子胜, 邹银生, 王贻荪. 考虑位移非线性影响的深基坑土压力计算模型研究[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 107~111.
- [6] CASPEMS. Surface settlement adjacent to braced open cuts [J]. JSMFD, 1966, 92(SM4): 51~59.
- [7] 刘兴旺, 益德清, 施祖元. 基坑开挖地表沉陷理论分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 51~55.

力特征值对应的 s/b 取值范围。

参考文献

- [1] 鲁绪文, 刘慈军, 娄炎, 等. 真空堆载联合预压技术加固高速公路桥头软基试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2007(1): 21~26.
- [2] 王炳龙, 杨龙才, 宫全美, 等. 真空联合堆载预压法加固软土地基的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 499~503.
- [3] 李海芳, 龚晓南, 温晓贵. 桥头段刚性桩复合地基现场观测结果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2780~2785.
- [4] 刘海涛, 谢新宇, 程功, 等. 刚—柔性桩复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 303~306.
- [5] 张世民, 魏新江, 秦建堂. 长短桩在深厚软土中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5427~5432.
- [6] 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.
- [7] 费勤发, 马海龙, 洪瑞康. 桩长与水泥掺入量对柔性桩承载力的影响[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 54~59.
- [8] 杨庆光, 周波, 张可能, 等. 复合地基内附加应力及有效桩长的探讨[J]. 勘察科学技术, 2006(6): 6~9.
- [9] 宋修广, 王松根, 杨永顺, 等. 水泥粉喷桩荷载传递规律的试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 81~85.
- [10] JGJ94-94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [11] JGJ79-2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [12] 陈善雄, 许锡昌, 赵文光. 柔性荷载下粉喷桩复合地基承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 274~278.