

沉降控制复合地基设计与测试研究

黄广龙¹, 惠 刚¹, 梅国雄¹, 郑东明²

(1. 南京工业大学土木工程学院, 南京, 210009, 2. 江苏省建筑科学研究所, 南京, 210008)

摘 要: 分析了深层搅拌桩复合地基承载特性及影响复合地基沉降变形的因素, 针对具体工程, 对深层搅拌桩复合地基以沉降作为控制标准进行设计, 并通过桩间土应力和桩顶应力的测试, 研究了复合地基桩土应力分布特性。沉降监测结果表明, 该建筑物沉降量与预测值较为接近, 表明在软土层较厚并且存在软弱下卧层地区, 复合地基按沉降控制设计是可行的。

关 键 词: 水泥土搅拌桩; 复合地基; 沉降控制; 原位测试

中图分类号: TU 473.1⁺²

文献标识码: A

Design and test research on settlement-control of composite foundation

HUANG Guang-long¹, HUI Gang¹, MEI Guo-xiong¹, ZHENG Dong-ming²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. Jiangsu Architecture Science Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: The bearing capacity properties and the influencing factors to building settlement control factors of the composite foundation disposed with deep-mixing pile are both analysed. In allusion to an actual project which is designed with the settlement-control criterion, the load stress distribution characteristic of composite foundation between pile and soil is also studied by the in situ tests with the pressure sensors set on pile top and nearby soil stress and the pile top stress with the settlement-control criterion. The results of the settlement monitoring show that the value of the building settlement is consistent with the predicted one, so as to prove that the settlement control design of the composite foundation is feasible in thick soft clay area or even with the area that existing the soft substratum.

Key words: soil cement mixing piles; composite foundation; settlement control; in-situ test

1 引 言

水泥搅拌桩复合地基对减少软弱地基上的中小型建筑物的沉降及差异沉降有着明显的效果, 是加固饱和软黏土地基的一种有效方法。深层搅拌桩复合地基可以按承载力控制设计, 也可以按沉降控制设计。按承载力控制设计是先满足地基承载力要求, 再验算沉降是否满足要求, 直至两者均满足要求为止。按沉降控制设计思路是先按沉降控制要求进行设计, 然后验算地基承载力是否满足要求。如承载力不能满足要求, 适当增加复合地基置换率或增加桩长, 使承载力满足要求即可^[1]。在复合地基设计中, 水泥搅拌桩是作为减少沉降的措施和构件来使用的, 那么只要将复合地基的沉降控制在设定的容许沉降之内, 同时满足承载力要求, 从而达到使经

济效益最优、各种参数组合合理的目的, 这即是沉降控制设计方法的基本思想。对软弱地基的处理, 按沉降变形控制设计思想比通常采用的强度控制设计理论在实践上具有更大的经济效益, 在理论上也是更为合理的。水泥土搅拌桩复合地基基础沉降与被加固土体及下卧层土体的性质有关, 同时水泥土搅拌桩的设计参数也直接影响复合地基的沉降特性。

2 复合地基沉降控制因素

2.1 桩长与基础沉降的关系

复合地基最终沉降量: $s = s_1 + s_2$, 其中 s_1 为桩长范围复合土体的沉降量, s_2 为桩端下土层的沉降量。

根据大量的资料及对多个工程实例的计算表明: s_1 占总沉降量 s 的比例较小。因此, 复合地基的

最终沉降量主要取决于桩端下卧层土体的沉降量^[2]。对于同一建筑物来说,其沉降计算深度是一定的,那么建筑物的沉降取决于加固土层的厚度,即加固土层的厚度越大(桩端下受力土层厚度越小)建筑物沉降就越小。仅仅提高置换率 m 和增加水泥土的强度 q_u 并不能明显减少建筑物的沉降,只有增加加固深度才是减少建筑物沉降的有效方法。

搅拌桩复合地基从承载力设计的角度,可以认为存在一个有效桩长的概念。但以往按这一理论设计的搅拌桩复合地基沉降量普遍较大,深厚软土层地区尤其如此。南京长江漫滩地区深层搅拌桩复合地基基础沉降大多在 10~30 cm,有的甚至超过 30 cm,过大的沉降值使差异沉降难以控制。建筑物出现倾斜的例子不在少数。因此,深层搅拌桩按变形控制设计比按承载力设计更合理。以往按承载力设计有效桩长的概念应予突破。

搅拌桩属柔性桩,在建筑物荷载作用下,桩与桩周土体组成复合地基来共同承担荷载并协调变形。桩土应力比是复合地基设计的重要内容,它不仅与桩周土的特性有关,而且还受到桩体尺寸、弹性模量和复合地基所受的总荷载的影响^[3]。研究表明:当荷载较小时,作用于复合地基上的荷载按刚度分配,水泥土桩体刚度大,应力就相对集中,桩土应力比为 2~5 左右,桩体起主要承载作用;当荷载较大时,桩身上部变形增大较快,随着桩体变形的加大,作用于桩体部分的应力向桩周土体转移,当桩身产生的轴向压力超过桩身的极限强度时桩土应力比趋于常数。据试验表明^[4~5],水泥土搅拌桩单桩桩身主要受力段位于桩顶 2~3 倍桩直径(4~5 m)范围内,复合地基中桩身主要受力段位于桩顶部,因此在搅拌桩设计中,应加强上部桩身的强度,从而保证桩体的良好受力特性。对于超过 10 m 的桩,其下部受力很小,主要起减小地基沉降的作用。图 1 为南京河西地区采用深层搅拌桩复合地基的多层建筑沉降与桩长的关系^[6]。由图可见,复合地基沉降量随桩

长的增加而减少幅度较大。过短的桩长直接影响桩的承载力,是不适宜的,而长桩并不一定造成浪费,适当的增加桩长能够有效地减小建筑物的沉降量。

2.2 水泥掺量的选择

水泥土强度随水泥掺量增加而提高,水泥掺量小于 5 % 时,固化反应很弱,水泥土比原状土强度增加甚微。当水泥掺量超过一定数量时,强度增加幅度减缓,而且成本增加幅度较大,工程应用上常取 $a_w = 7 \% \sim 25 \%$ ^[7]。增加水泥土强度 q_u 可提高加固土层变形模量,减少加固土层的沉降,但加固土层沉降本身较小,因此,超出一定范围,水泥掺量提高对最终沉降量影响不显著。

2.3 复合地基置换率与沉降量关系

复合地基置换率的大小与工程造价有直接的关系,它与建筑物沉降量的关系值得去探讨。由复合地基沉降计算中的复合模量法可推知置换率的大小与沉降量的关系,文献[6]针对具体工程,将不同置换率与复合模量、计算沉降量的关系进行了对比,见表 1:

表 1 置换率与复合模量、计算沉降量的关系
Table 1 Relationship between composite modulus and replacement ratio and settlement

	置换率/ %		
	20	30	40
复合模量/ MPa	25.88	37.65	49.41
计算沉降量/ mm	189	175	162

从表 1 可以看出,每提高 10 % 的置换率,沉降就减少约 10 mm,文献[8]通过三维有限元分析认为当置换率由 20 % 增加到 30 %,沉降量仅减少 10 mm,沉降量和沉降差减少不大。与文献[6]的结论相似。一般建议复合地基置换率为 30 % 左右。

3 沉降控制复合地基设计

深层搅拌桩复合地基是南京长江漫滩地区以往使用较多的一种地基处理方法,除了理论方面的研究工作外,针对该地区软土工程特性,通过现场实测,可以了解深层搅拌桩复合地基承载力及沉降情况,了解深层搅拌桩复合地基在筏板基础和上部结构荷载的共同作用下的工作特性。为此选择了一幢有代表性的多层住宅进行试验研究。

3.1 工程概况

某小区 08 幢建筑采用深层搅拌桩处理软土地基,建筑面积 1 927 m²,7 层砖混结构,为减小地基不均匀沉降,采用筏板基础,筏板厚 400 mm,砂石褥垫层厚 300 mm。1999 年 12 月 1 日开工建设,2000 年 7 月 31 日封顶,半年后交付使用,经过对

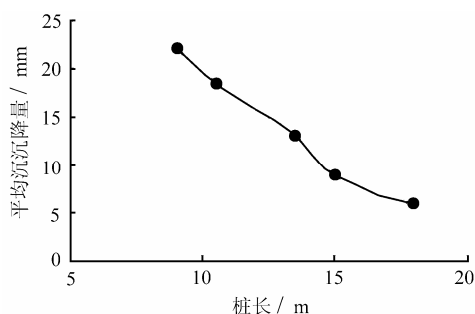


图 1 桩长与基础沉降的关系
Fig.1 Relationship between the length of pile and settlement of foundation

该桩建筑长期的数据测试, 取得了丰富的实测资料及有价值的成果。该场地地基土层设计参数见表 2:

表 2 土层分布及土的物理力学指标
Table 2 Distribution of soil layers and their physico-mechanical parameters

层次	土层描述	W	e	E_s /MPa	f_k /kPa	q_{sk} /kPa	q_{pk} /kPa
1-2	杂填土、素填土	34.8	0.969	3.47	95	20	
1-3	淤泥质粉质黏土含淤泥	42.6	1.171	2.45	55	11	
2-1	粉质黏土含淤泥	33.4	0.923	3.77	120	40	
2-2	淤泥质粉质黏土、粉土及粉砂	42.2	1.180	2.35	55	15	
2-3	淤质粉质黏土含粉质黏土	37.4	1.075	2.92	75	20	750

3.2 沉降控制复合地基设计

软土地区建筑工程事故大部分是由沉降或沉降差过大造成的, 在这种情况下按沉降控制设计是合理和适宜的。按沉降控制设计即是沉降作为基础设计的控制目标, 同时验算地基承载力是否满足要求。

南京河西地区在复合地基承载力满足设计要求的情况下, 其最终沉降量却往往过大, 远远超过控制标准。因此, 在该地区进行复合地基设计时应以沉降作为控制标准进行设计, 具体设计步骤如下:

(1) 按承载力要求对复合地基进行常规设计, 初步确定桩长、置换率、水泥掺量等设计参数。本工程初步确定平均控制沉降量取 180 mm (以往该地区复合地基沉降在 200 mm~300 mm);

(2) 对复合地基进行沉降计算, 将计算沉降量与控制沉降量进行比较, 如计算沉降大于控制沉降量, 则通过增加桩长, 调整置换率来减少沉降计算量, 达到控制沉降的目的。

08 幢深搅桩设计采用双头搅拌桩, 初步确定桩径 $D = 700$ mm, 置换率 40 %, 桩数总计 626 根, 设计要求复合地基承载力标准值 $f_{sp,k} = 150$ kPa, 分别取有效桩长为 10 m, 12 m, 14 m, 16 m 时进行沉降计算, 基础沉降计算结果见表 3:

表 3 不同桩长基础沉降计算值
Table 3 Settlements of the raft boards with different pile lengths

有效桩长/m	10	12	14	16
计算沉降量/mm	241	224	181	145

由表 3 的沉降计算结果, 经对比分析, 选择有效桩长 14 m 为设计桩长, 其计算最终沉降可以满足设计要求。

4 原位测试元件及沉降观测点布置

深层搅拌桩施工结束后, 埋设了 19 只压力盒, 对 08 栋的沉降量和桩顶、桩间土的反力进行观测, 桩位图、沉降观测点和压力盒布置如图 2 所示。由于施工场地的复杂因素, 压力盒先后损坏了 7 只。

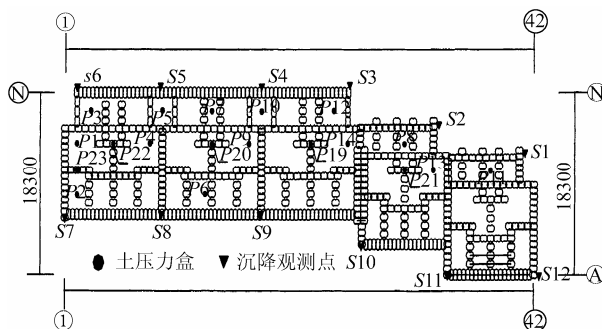


图 2 压力量测及沉降观测点布置图

Fig.2 Distribution of the soil pressure cells and the points of settlement observation

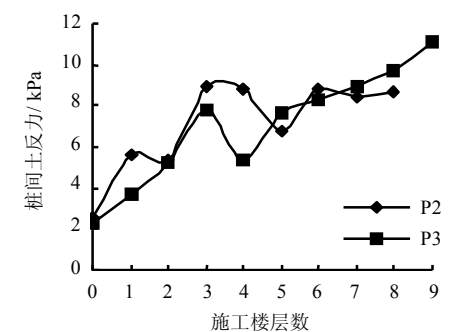
5 测试成果分析

5.1 应力测试分析

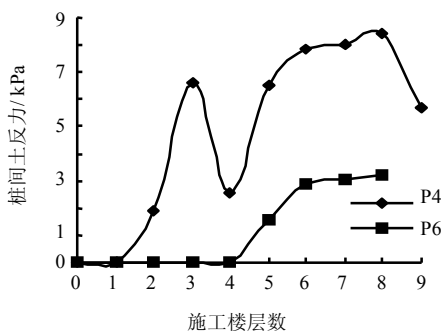
图 3, 4 中横坐标表示施工层数, 0 表示筏板基础施工时, 8 表示结构封顶时, 9 为封顶一年后, 纵坐标表示反力。从图 3, 4 可以看出, 随着上部结构层数的增加, 荷载逐渐增加。当荷载较小时, 作用在复合地基上的荷载按刚度来分配, 桩土共同承担上部荷载, 满足变形协调。水泥土桩的刚度相对于土较大, 而且由于筏板基础刚度的影响, 应力相对集中, 桩顶首先承受荷载, 桩体起主要承载作用。P20, P21, P22, P23 处桩顶反力随建筑物楼层 (荷载) 的增加而增加, 桩顶反力变化幅度从 0~51 kPa。

从图中可以看到, 一般情况下, 桩顶土反力与荷载关系曲线存在一个拐点, 这表明随着荷载的增加, 桩顶土压力在荷载水平较低阶段增加较快, 但随着施工超过 2 层以后, 土压力的增加并不明显, 复合地基中桩间土应力增量呈递减趋势发展, 土压力曲线由陡变为平缓。随着荷载的增大, 搅拌桩桩体上部首先产生压缩变形, 桩间土进一步被挤密, 随着桩体变形的增大, 桩顶的应力逐渐向桩间土转移, 使得桩间土逐步承受上部的荷载。但从桩间土土压力与荷载关系曲线来看, 筏板基底下土压力很小, 土体所分担的上部荷载较少。但是桩间土受力并不均匀, 在筏板的不同部位土的反力差异很大, 在某些部位土体几乎没有反力, 或者反力很小 (如 P6), 有可能土压力盒在埋设时存在问题。建筑物

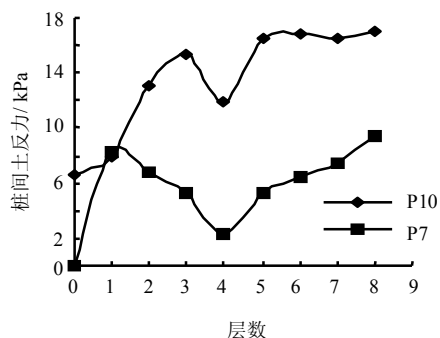
施工从基础至 3 层时,土压力与上部荷载大致呈线性关系,当建筑物超过 3 层后,桩间土应力变化相对较小。



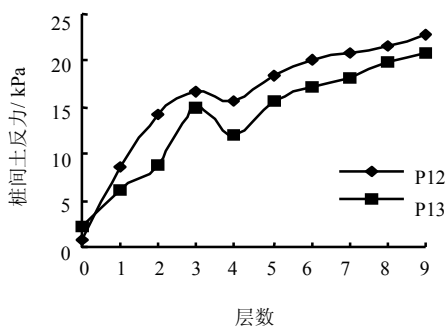
(a)



(b)



(c)

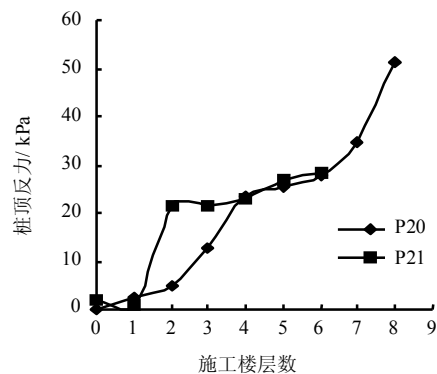


(d)

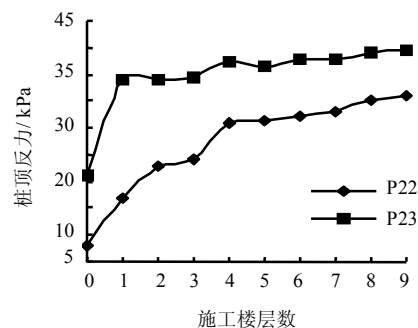
图 3 桩间土反力与荷载关系曲线

Fig.3 Relationship between load and soil pressure

从荷载作用下桩顶与桩间土反力看,桩土应力比约为 2~5,这与以往的实测结果相近。



(a)



(b)

图 4 桩顶反力与荷载关系曲线

Fig.4 Relationship between load and pressure on the top of pile

5.2 建筑物沉降分析

水泥土深层搅拌桩复合地基的变形由加固以后桩长范围内的复合土层的压缩变形 s_1 和桩端以下未加固土层的变形 s_2 两部分组成。本工程以沉降作为控制标准进行设计,建筑物封顶后 60 d 后及 19 个月后的观测值见表 4,平均观测沉降值为 74.3 mm, 148.74 mm, 平均沉降速率为 0.53 mm/d, 0.022 mm/d; 采用复合模量法和等效实体法计算建筑物平均沉降值为 181 mm, 由目前的沉降观测资料看,该建筑物沉降已基本稳定,推算该建筑最终沉降量为 150~190 mm,与设计时的控制值较为接近。从沉降实测值和沉降速率来看,该建筑采用深层搅拌桩复合地基沉降较为均匀,沉降量较小,推导最终沉降量小于设计控制值,达到了预期的效果。

由此可见,在软土地区,当采用深层搅拌桩复合地基时,桩长按变形控制设计比按承载力设计更为合理,使以往按照按承载力设计时不能有效控制建筑物沉降量及差异沉降的情况得到了有效的改善。

表4 建筑物沉降量观测值
Table 4 Observed value of the settlement

沉降观测点	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
封顶3个月后 沉降值/mm	70	77	77	71	71	67	74	78	79	73	84	74
沉降速率/mm/d	0.48	0.45	0.56	0.50	0.55	0.51	0.56	0.56	0.57	0.55	0.55	0.48
封顶19个月后 沉降值/mm	138.36	151.65	158.86	165.67	166.24	167.63	175.02	177.32	168.91	157.36	156.92	144.62
沉降速率/mm/d	0.023	0.026	0.027	0.023	0.026	0.026	0.020	0.017	0.017	0.018	0.017	0.018

6 结 论

(1) 沉降控制复合地基是对复合地基设计提出的更高要求, 以往复合地基设计重承载力设计而轻视了对沉降的要求。“沉降控制”是为了保证建筑物的正常使用, 在承载力满足要求的前提下, 强调将沉降控制在一定的允许范围内, 是对以往按承载力设计理论的深化。

(2) 复合地基加固深度对基础最终沉降量影响较大。从复合地基承载力角度, 一般地基加固深度在 10~12 m 即可满足要求。但对基础沉降控制来说, 在深厚软土地区深层搅拌桩桩长加大对控制基础沉降是有效的。

(3) 本工程以沉降作为控制目标进行设计, 通过优化比较选择合理的桩长和置换率, 沉降监测结果表明建筑物封顶 19 个月后, 基础平均沉降为 148.7 mm, 并已基本稳定, 沉降控制在设计允许范围以内, 取得了较为理想的效果。

(4) 对桩间土应力和桩顶应力测试得到的桩土应力分担比与以往的实测结果接近, 反映了深层搅拌桩复合地基的桩土共同作用的基本特性。

参 考 文 献

- [1] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 郝玉龙, 王立忠, 陈云敏, 等. 深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 345—349.
HAO Yu-long, WANG Li-zhong, CHEN Yun-min, et al. Analysis and control of the settlement in thick soft clay ground reinforced by deep mixing cement piles [J] Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (3): 345—349.
- [3] 郑俊杰, 黄海松. 水泥土桩复合地基桩土应力比的解析算法 [J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1 432—1 436.
ZHENG Jun-jie, HUANG Hai-song. Analytical solution of pile-soil stress ration of soil-cement pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1 432—1 436.
- [4] 叶观宝, 叶书麟. 水泥土搅拌桩加固软基的试验研究[J] 同济大学学报, 1995, 23(3): 270—275.
YE Guan-bao, YE Shu-lin, Field study of improved soft soil by cement-soil mixed piles[J]. Journal of Tongji University, 1995, 23(3): 270—275.
- [5] 秦建庆, 叶观宝, 费涵昌. 水泥土桩复合地基桩土分担荷载的试验研究[J]. 工程勘察, 2000, 1(3): 32—34.
QIN Jian-qing, YE Guan-bao, FEI Hanc-hang, Test research of soil-pile sheared load of soil cement mixing piles of composite foundation[J] Geotechnical investigation & surveying, 2000, 1(3): 32—34.
- [6] 黄广龙, 郑东明, 吴海宁, 等. 南京河西地区软土的工程特性及地基处理方法研究[R]. 南京: 江苏省建筑科学研究院, 2000.
- [7] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [8] 周建明. 丰定祥, 郑宏. 深层搅拌桩复合地基的有限元分析[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 44—50.
ZHOU Jian-ming, FENG Ding-xiang, ZHEN Hong. Finite element analysis for compound foundation of deep mixing piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 44—50.