

深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制

Analysis and control of the settlement in thick soft clay ground reinforced by deep mixing cement piles

郝玉龙¹, 王立忠¹, 陈云敏¹, 陈胜乐²

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 温州浙大地基基础工程公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 深层水泥搅拌桩是处理深厚软土地基的有效方法。本文结合温州地区典型深厚软土, 首先分析了采用水泥搅拌桩加固的4~8层建筑物地基的长期沉降观测结果, 并用传统的方法进行了沉降计算, 发现计算结果是实测结果的3倍左右。然后, 试验研究了典型温州软土的结构性, 得出主要压缩层的土体结构屈服应力比在1.7~2.5范围内, 发现当下卧层的附加应力 q_2 与有效自重应力 $q_{0'}$ 之和小于土体结构屈服应力 σ_{sy} 时, 建筑物沉降将得到有效控制。最后, 在前人研究工作的基础上, 提出考虑软土结构性的沉降计算方法, 考虑土的结构性对下卧层沉降的影响, 对12幢不同层数的建筑物进行了沉降计算, 计算结果与实测结果相当一致。

关键词: 深厚软土; 结构性; 水泥搅拌桩; 复合地基; 沉降控制

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)03-0345-05

作者简介: 郝玉龙, 男, 1971年生, 浙江大学岩土工程研究所博士生。

HAO Yu-long¹, WANG Li-zhong¹, CHEN Yun-min¹, CHEN Sheng-le²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Wenzhou Foundation Engineering Company, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Deep mixing cement pile is a effective method to reinforce thick soft clay ground. In allusion to the typical thick soft clay in Wenzhou, this paper analyses the chronically monitored settlement of 4~8 floor building's composite foundation reinforced by deep mixing cement piles, and calculates the settlement with traditional method, and find that calculated settlement is 2 times greater than monitored value. The structure characteristics typical soft clay is studied through experimentation, and the yield stress ratio of soil structure is found in the range of 1.7~2.5, and the settlement of building will be effectively controlled when the sum of superimposed stress and effective self-weight stress is less than yield stress of soil structure in under-lying soft layer. Finally, referring to other researchers' studies and in view of the influence of soil structure characteristics to the settlement of under-lying soft layer, a new settlement calculation method has been put forward. With this method, settlement of 12 buildings are calculated and the calculated results are very close to the monitored results.

Key words: thick soft clay; structure characteristics; mixing cement pile; composite foundation; settlement control

1 引言^y

软土是软弱粘性土的简称, 包括淤泥、淤泥质粘土、淤泥质亚粘土等等, 多为海相、河相或泻湖相沉积层, 广泛分布在我国沿海及内河两岸和湖泊地区。沿海地区软粘土一般具有厚度大、高含水量、大孔隙比、低强度、高灵敏度、高压缩性、低渗透性等特点。80年代以来, 我国沿海地区广泛应用深层水泥搅拌桩加固4~9层民用住宅、办公楼的软土地基。水泥搅拌桩是非挤土柔性桩, 成桩过程中对桩间土体的结构性扰动破坏极小, 其本身强度比天然土体提高几十倍甚至数百倍, 与桩间土体形成的复合地基可以有效地提高地基承载力和减少沉降。复合地基加固层沉降量很小, 通常小于30 mm^[1, 2], 沉降主要发生在下卧层。与天然地基相比, 复合地基加固层比相应厚度的天然地基土层压缩量大大减小, 而下卧层土层由于加固层存在, 扩

大了高应力区范围并向下移动, 导致下卧层压缩量增加, 但总沉降较之于天然地基要小得多^[2, 3]。复合地基沉降传统的计算模式是把总沉降 S 分为加固层沉降 S_1 和下卧层沉降 S_2 , 其中 S_1 采用复合模量法计算, S_2 通常采用分层总和法选用压缩指数 C_c 或压缩模量 E_s 两个指标计算。但计算结果与实测沉降值之间常有较大出入, 甚至相差几倍^[4]。笔者认为, 这种差异主要是由于下卧层沉降计算值与实际沉降值不符造成的, 加固层的沉降计算结果与实际变形值不会有太大出入。本文将大量的实测沉降资料为基础, 从研究软土的结构性入手, 探讨土的结构性对水泥搅拌桩复合地基下卧层沉降的控制作用; 在前人研究工作的基础上, 提出考虑土的结构性计算下卧层沉降的方法, 并将计算结果与实测结果进行比较, 以提高对结构性软土水泥搅拌桩复合地基沉降的认识。

2 深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降及其计算

2.1 深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降特点

温州地处浙南沿海,瓯江下游南岸,是国内最典型的软土地区。其上部为滨海相淤积土,下部为湖海相沉积层,自上而下分为硬壳层粘土、淤泥、淤泥质亚粘土及淤质粘土等几个地质层,软土厚度达 30 m 左右。80 年代末,温州采用单轴深层水泥搅拌桩加固软土地基技术,在工程试验成功的基础上,建造了一大批 4~8 层的混合结构民用住宅楼。为进一步论证和了解复合地基的长期稳定性及地基加固效果,有关单位对不同地段不同层次的 12 幢建筑物在工程施工期间及竣工后进行了长达七年的地基沉降观测,观测点均沿建筑物外侧地基周边布置,每座建筑物布置 8~12 个测点(四角点均布置有测点)。建筑物尺寸及复合地基设计参数见表 1,具体实测结果见图 1 及表 2。观测结果表明:深层水泥搅拌桩加固软土地基后,建筑物沉降量小,沉降均匀,稳定快,工程竣工时已完成 90% 以上的

沉降量,远远大于《建筑地基基础设计规范》中对于高压缩粘性土在工程施工期间只能完成最终沉降量的 5%~20% 的预计;层次较高的建筑物,虽然荷载较大,但通过适当调整桩长、桩径、置换率等设计参数,总可以满足荷载对地基的要求,使地基沉降量控制在较低水平。

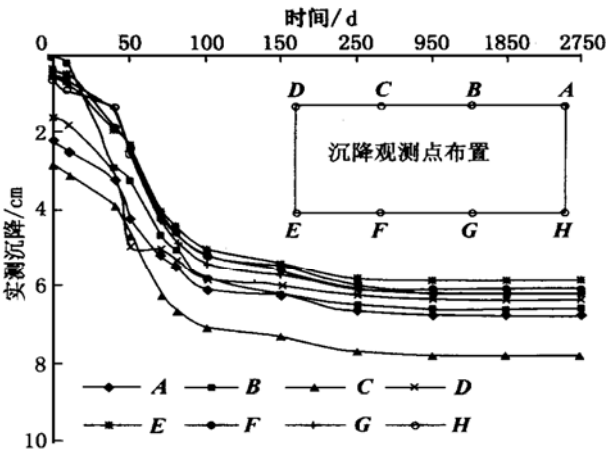


图 1 水心小区柑组团# 16 楼实测沉降- 时间曲线

Fig. 1 The curve of monitored settlement and time for the sixteenth building in Shuixin district

表 1 复合地基设计参数

Table 1 The design parameters of composite foundation

编号	建筑物名称	层次	建筑物长×宽 (m×m)	条形基础		复合地基设计参数			
				宽度/m	埋深/m	桩长/m	桩径/mm	水泥掺合比	置换率
1	水心小区柑组团# 16	6	30.85×10.00	1.0	0.5	12.5	500	0.15	0.20
2	瓯海县址东# 5	4	32.5×10.25	1.0	0.5	9.5	500	0.15	0.18
3	上陡门六组团# 3	6	50.0×10.0	1.0	0.5	15.0	500	0.15	0.20
4	上陡门六组团# 5	5	18.0×10.0	1.0	0.5	9.5	500	0.15	0.20
5	上陡门六组团# 21	6	27.0×10.0	1.0	0.5	13.5	500	0.15	0.20
6	上陡门六组团# 23	4	27.0×10.0	1.0	0.5	9.5	500	0.15	0.20
7	上陡门六组团# 25	6	35.0×10.0	1.0	0.5	15.0	500	0.15	0.20
8	状元新街# 46A 幢	5	26.4×10.0	1.0	0.5	12.0	500	0.15	0.25
9	马鞍池# 12	6	29.7×11.7	1.0	0.5	15.0	500	0.15	0.30
10	马鞍池# 15	6	33.4×10.2	1.0	0.5	15.0	500	0.15	0.25
11	马鞍池# 19	8	33.1×11.8	1.6	0.5	15.0	550	0.15	0.35
12	马鞍池# 21	8	43.8×10.8	1.6	0.5	18.0	550	0.15	0.35

表 2 实测与计算沉降结果

Table 2 The monitored and calculated settlement

编号	建筑物名称	实测沉降		压缩指数计算 $S_1 + S_{2C_s}$		压缩模量计算 $S_1 + S_{2E_s}$		结构性计算 $S_1 + S_{2C_s}$	
		min	max	min	max	min	max	min	max
1	水心小区柑组团# 16	59	78	215	248	215	247	63	91
2	瓯海县址东# 5	38	64	205	243	208	240	45	59
3	上陡门六组团# 3	66	94	176	204	195	224	71	106
4	上陡门六组团# 5	51	84	219	252	218	246	49	62
5	上陡门六组团# 21	42	71	76	92	111	128	55	73
6	上陡门六组团# 23	38	60	191	226	196	226	44	56
7	上陡门六组团# 25	57	87	158	183	179	205	64	93
8	状元新街# 46A 幢	43	67	143	163	162	181	42	56
9	马鞍池# 12	39	63	103	117	136	150	45	61
10	马鞍池# 15	48	85	125	145	153	174	52	76
11	马鞍池# 19	56	63	131	148	160	177	64	83
12	马鞍池# 21	62	83	76	92	111	128	55	73

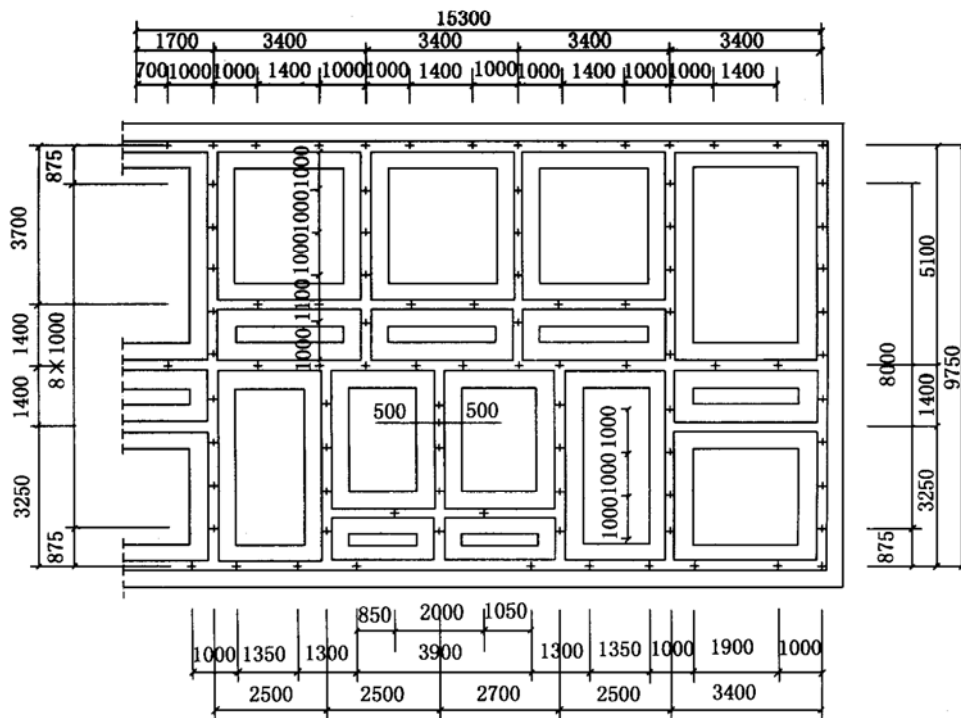


图2 桩位平面布置

Fig. 2 The distribution of mixing cement piles

2.2 沉降计算

水心住宅小区柑组团[#]16楼为六层混合结构住宅,水泥搅拌桩复合地基桩位平面布置见图2。

加固层沉降 S_1 按复合模量法计算^[5],将加固层桩群视为一个格栅状的假想实体基础,加固层沉降即为该实体基础的压缩变形量。涉及到的计算参数取值为:搅拌桩变形模量 $E_{50} = 156 \text{ MPa}$,桩间土压缩模量 $E_s = 1130 \text{ kPa}$,桩数 $n = 174$ 根,单桩截面积 $A_p = 0.2 \text{ m}^2$,实体基础底面积 $A_1 = 97.5 \text{ m}^2$,复合地基设计荷载 $f_{sp} = 165 \text{ kPa}$,建筑物条形基础底面积 $A = 195.8 \text{ m}^2$,假想实体基础边缘软土的承载力 $f_s = 60 \text{ kPa}$;假想实体基础的自重 $G = 8028.9 \text{ kN}$,假想实体基础的侧表面积 $A_s = 4730.9 \text{ m}^2$,桩周土容许摩擦力 $\bar{q}_s = 5 \text{ kPa}$;基底以上土的加权平均容重 $\gamma'_p = 6.8 \text{ kN/m}^3$,有效桩长 $L = 12.0 \text{ m}$ 。经计算加固层沉降 $S_1 = 33 \text{ mm}$ 。

下卧层沉降 S_2 采用分层总和法,选用压缩指数 C_c 和压缩模量 E_s 分别按以下两式计算:

$$S_{2C_c} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{ci} \Delta H_i}{1 + e_{0i}} \lg \left| \frac{\sigma_{0i} + \sigma_{zi}}{\sigma_{0i}} \right|, S_{2E_s} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{Si}} \Delta H_i$$

计算深度按《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)中的有关规定确定。结合现场沉降观测点的实际布置位置(沿建筑物外侧基础周边布置),选取实测最小及最大沉降点E、C(见图1)作为计算点,所用参数自表3选取。E点计算结果为: $S_{2C_c} = 182 \text{ mm}$, $S_{2E_s} = 182 \text{ mm}$;C点计算结果为: $S_{2C_c} = 215 \text{ mm}$, $S_{2E_s} = 214 \text{ mm}$ 。将加固

层及下卧层沉降相加,即得总沉降。按此方法,笔者还对表1中所列的另外11幢建筑物进行了沉降计算,具体计算结果见表2。自表中可看出计算总沉降普遍达到实测沉降值的3倍左右,下卧层沉降量最大可达总沉降的85%以上。

3 软土的结构性及建筑物沉降控制

3.1 软土的结构性研究

软土的结构性是指土颗粒和孔隙的性状、排列型式(或称组构)及颗粒之间力的相互作用。笔者从大量室内常规试验及三轴试验成果得出温州软土具有较强的结构性^[6]。主要表现在以下几个方面:①高孔隙比,薄壁土样的孔隙比可达1.9左右;②强透水性,薄壁土样竖向固结系数 C_v 值最高可达 $4.04 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$,是同等条件下重塑土样的9倍左右;③应力-应变曲线在低应变阶段,应力增长迅速,应力应变关系呈弹性状态,至峰值出现后,塑性变形所占比例逐渐增大,应力逐渐降低至残余应力状态;而孔隙压力在低应变阶段很低,增长缓慢,随着应变的增大,孔隙压力出现峰值,之后逐渐降低并趋近于稳定值;④薄壁土样 $e - \lg P$ 曲线的初始段较为平缓,当固结压力超过土体结构屈服应力值后,曲线出现陡降段,典型曲线如图3所示。试验得到的各土层物理力学参数见表3。

3.2 土体结构屈服应力确定的新方法

土体结构屈服应力是指原状土在受压缩过程中,

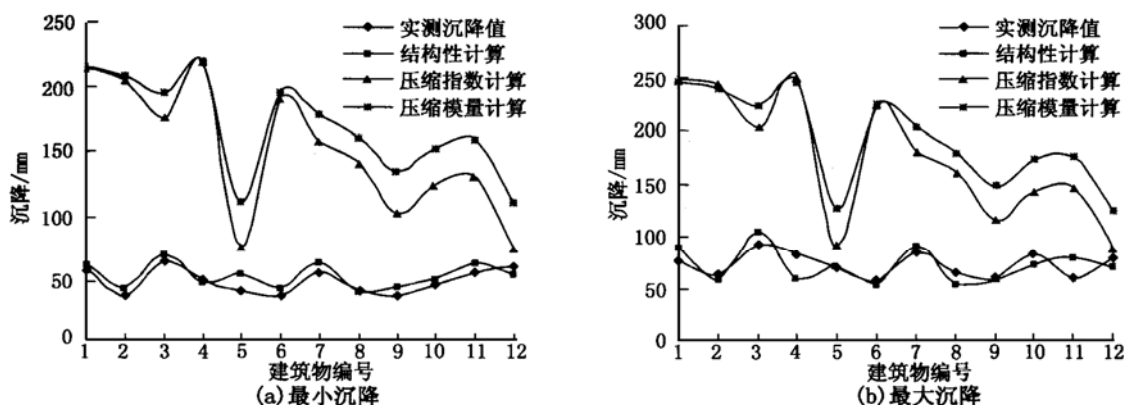


图4 实测沉降与计算沉降比较

Fig. 4 The comparison between monitored and calculated settlement

σ_{sy} 时选用压缩指数 $C_c^{[7,8]}$ 。相应的计算公式为

$$\begin{aligned} \sigma_{z0}' + \sigma_z \leq \sigma_{sy} \text{ 时, } S_{2Cs} &= \sum_{i=1}^k \frac{C_{Si} \Delta H_i}{1 + e_{0i}} \lg \left| \frac{\sigma_{z0i}' + \sigma_{zi}}{\sigma_{z0i}'} \right| \\ \sigma_{z0}' + \sigma_z > \sigma_{sy} \text{ 时, } S_{2Cs} &= \sum_{i=1}^m \frac{\Delta H_i}{1 + e_{0i}} C_{Si} \lg \left| \frac{\sigma_{syi}}{\sigma_{z0i}'} \right| + \\ &\quad C_{Ci} \lg \left| \frac{\sigma_{z0i}' + \sigma_{zi}}{\sigma_{syi}} \right| \end{aligned}$$

式中 S_{2Cs} 为考虑土的结构性的下卧层沉降; ΔH_i 为第 i 分层土体厚度; σ_{z0}' 为土体有效自重应力; σ_z 为地基中竖向附加应力, 按布西涅斯克解计算; σ_{sy} 为土体结构屈服应力; k 与 m 之和等于下卧层计算分层总数。对表 1 所列的 12 幢建筑物复合地基下卧层考虑土的结构性进行了沉降计算, 加固层沉降仍采用复合模量法计算, 计算所得总沉降见表 2。

将表 2 中实测与计算结果进行对比, 见图 4。由图可见, 将加固层群桩视为一格栅状的假想实体基础, 采用复合模量法计算加固层沉降, 下卧层沉降考虑土的结构性用分层总和法计算, 所得计算总沉降与实测结果较为一致, 而下卧层沉降采用压缩指数及压缩模量计算, 所得计算总沉降与实测结果相差较大, 说明在深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降计算中, 应该考虑土体结构性对下卧层沉降的影响。

5 结 语

(1) 深层水泥搅拌桩属于非挤土柔性桩, 在成桩过程中对周围土体扰动破坏较小, 很好地保护了周围土体结构的完整性, 而其本身又具有较高的强度和承载力, 对软土地基的加固效果较好。实践证明: 温州地区应用深层水泥搅拌桩加固软土地基后, 建筑物沉降量小, 沉降均匀, 稳定时间短。对于不同层次的建筑物, 只要适当调整桩长、桩径、置换率等复合地基设计参数, 总能满足不同荷载对地基承载力的要求, 使地基沉

降量控制在允许范围内。

(2) 深厚软土水泥搅拌桩复合地基设计应满足承载力和沉降的要求, 以沉降控制为主。加固层沉降较小, 一般为 30 mm 左右, 所谓沉降控制实质上主要是控制软弱下卧层的沉降。在复合地基设计中, 应根据上部建筑物荷载的大小, 选取合适的设计参数, 力求把下卧层的附加应力 σ_z 控制在土体结构屈服应力 σ_{sy} 与有效自重应力 σ_{z0}' 的差值之下, 使下卧层土体仍保持较好的结构性, 这样下卧层沉降将得到有效控制。

(3) 沉降计算表明, 深层水泥搅拌桩复合地基沉降主要是下卧层的沉降, 采用传统的方法计算下卧层的沉降, 计算所得总沉降是实测沉降值的 3 倍左右, 而考虑下卧层土的结构性进行计算时, 所得计算总沉降与实测结果较为一致。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 深层搅拌法在我国的发展[A]. 龚晓南. 深层搅拌法设计、施工经验交流论文集[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1993. 1~ 9.
- [2] YBJ225—91, 软土地基深层搅拌加固法技术规程(第 3.0.5 条)[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [3] 马克生. 柔性桩复合地基沉降可靠度分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [4] 郭志业, 詹佩耀. 深层水泥搅拌桩复合地基沉降计算[A]. 龚晓南. 深层搅拌法设计、施工经验交流论文集[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1993. 65~ 70.
- [5] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 470~ 473.
- [6] 浙江大学岩土工程研究所. 温州发电厂#2、#3 煤场工程试验研究报告[R]. 杭州: 浙江大学, 2000. 81~ 92.
- [7] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100~ 111.
- [8] 张诚厚, 袁文明, 戴济群. 软粘土的结构性及其对路基沉降的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 25~ 32.