

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.009

多桩型复合地基在湿陷性黄土中的应用

任连伟^{1,2},赵文成¹,顿志林¹

(1. 河南理工大学土木工程学院,河南 焦作 454000; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要: 结合土挤密桩与 CFG 桩组成的多桩型复合地基处理湿陷性黄土地基工程实例,讨论多桩型复合地基的设计方法,分析复合地基的承载力,并通过原位试验对复合地基处理黄土湿陷性的效果进行分析。试验结果表明,通过合理的工程设计,土挤密桩与 CFG 桩组成的多桩型复合地基能充分发挥桩和桩间土的优势,不仅可以消除黄土的湿陷性,而且能大幅度地提高地基的承载力、很好地控制地基沉降。

关键词: 地基处理;土挤密桩;CFG 桩;多桩型复合地基;湿陷性黄土

中图分类号: TU 473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)02-0140-05

Application of multi-type-pile composite foundation to collapsible loess

REN Lianwei^{1,2}, ZHAO Wencheng¹, DUN Zhilin¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through an application of the multi-type-pile composite foundation with earth piles and CFG piles to collapsible loess, the method for the design of the multi-type-pile composite foundation is introduced, the bearing capacity of the composite foundation is analyzed, and the collapsible treatment effect is described by in situ tests. The results show that the multi-type-pile composite foundation can make full use of the potential of piles and soils between piles by reasonable design; it not only enhances the bearing capacity of the natural foundation but also eliminates the collapsibility of loess, and it can effectively control the average settlement.

Key words: ground treatment; earth pile; CFG pile; multi-type-pile composite foundation; collapsible loess

复合地基能充分利用桩间土和桩体的共同作用且造价低廉,因此其在工程中得到广泛的应用,但多数工程倾向于采用单桩型的复合地基^[1-2]。当工程建设中的场地具有承载力低、压缩性高以及其他特殊性时(如湿陷性黄土地基、砂土液化地基等),单一桩型复合地基不能满足要求,此时可以采用多桩型复合地基或长短组合桩复合地基^[3-5]。闫明礼等^[6]从工程实际出发,提出了多桩型复合地基承载力和变形的计算方法,并通过工程实例验证了多桩型复合地基具有良好的技术和经济效益。崔激等^[7]利用有限元方法对山区沟谷软基中采用的 CFG 桩和水泥土夯实桩联合加固的多桩型复合地基进行分析,与单一桩型复合地基相比,其具有更好的完整性和承载性。王明山等^[8]通过某工程现场试验对 CFG 桩及振动沉管灌注成桩组成的多桩型复合地基进行研究,在消除砂层地基土液化及提高复合地基承载力方面进行了有益的尝试。冯玉芹等^[9]对采用碎石桩和 CFG 桩多桩型复合地基处理可液化土方面进行了机理及现场检测分析。陈强等^[10]采用数值分析手段初步分析了某工程中 CFG 桩和碎石桩联合加固软弱地基的机理,认为多桩型复合地基具有单一桩型无可比拟的优越性。王士杰等^[11-12]对某大型油罐工程采用 CFG 桩和碎石桩多桩型复合地基进行现场

试验研究,得出其能明显提高地基承载力。在复合地基中,强度较高的称为主桩或刚性桩,强度较低的称为次桩或柔性桩,它们依据各自的特性相互结合形成复合地基。

土挤密桩与 CFG 桩组合形成的多桩型复合地基利用土挤密桩的振动、挤密作用解决地基土的湿陷性,并对浅层土层进行初步加固;然后利用 CFG 桩来提高复合地基的承载力,使之满足设计要求。目前,利用多桩型复合地基处理地基中存在的湿陷性黄土的研究较少,本文依托焦作市某高层建筑地基处理工程,结合现场试验成果,对 CFG 桩和土挤密桩组成的多桩型复合地基在湿陷性黄土地基中的应用进行分析,以期更好地服务于类似工程。

1 工程概况

以焦作市某高层建筑采用的土挤密桩与 CFG 桩形成的多桩型复合地基为研究对象,根据现场测试结果对该类复合地基在高层建筑湿陷性黄土地基的应用进行相关研究。该工程地上 27 层,地下 1 层,上部为剪力墙结构,采用筏板基础,基础埋深 5.5 m,设计要求复合地基承载力特征值 f_a 达到 400 kPa。根据现场地岩土工程勘察报告,拟建工程场地平坦,无不良地质作用,其土层物理力学参数见表 1。

表 1 地基主要土层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of main soil layers										
层号	土质	厚度/m	$\omega/\%$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	e	$W_L/\%$	$W_P/\%$	$\rho_d/(g \cdot m^{-3})$	c/kPa	f_a/kPa
1	素填土	0.5~2.8								
2	黄土状粉质黏土	2.6~4.9	21.0	1.76	0.877	28.9	16.8	12.4	32.3	160
3	黄土状粉质黏土	3.7~5.0	22.1	1.86	0.982	29.2	16.7	8.6	28.9	160
4	粉质黏土	8.4~10.5	22.4	1.94	0.711	29.4	16.9	6.6	25.6	170
5	粉质黏土	5.4~7.0	24.3	1.95	0.732	28.0	16.5	5.3	20.9	160

根据场地取样试验,场地内第 2,3 层土为新近堆积的黄土状粉质黏土,为黄褐色、大孔隙结构,具有湿陷性,为 I 级非自重湿陷性黄土场地,其最大湿陷量为 196.83 mm。因基础埋深较大,处理范围内第 2 层土在基坑开挖过程中将被全部挖出,因此只考虑第 3 层土的湿陷性,其湿陷系数 δ_s 为 0.038。

复合地基中土挤密桩用来消除黄土的湿陷性,CFG 桩用来提高地基的承载力。其中土挤密桩较短,CFG 桩较长,在复合地基中形成 3 个不同的工作区域,即加固区 I、加固区 II、加固区 III(图 1)。

加固区 I 范围内存在刚性桩和柔性桩,桩体的置换率高,桩间土的挤密效果明显,其主要作用是消除黄土的湿陷性并初步提高浅层地基土的承载力;加固区 II 范围内仅有刚性桩,其作用方式不同于加固区 I,主要作用是提高复合地基土的承载力和减小沉降量;加固区 III 是承受桩体荷载的持力土,3 个加固区共同工作。

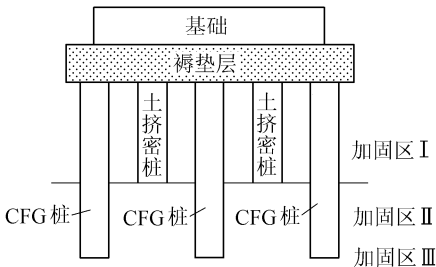


图 1 复合地基示意图

Fig. 1 Sketch map of composite foundation

2 多桩型复合地基设计方案

根据 GB50025—2004《湿陷性黄土地区建筑规范》的相关规定以及施工机械的特征,土挤密桩桩径取 500 mm,采用正三角形布桩方式,桩间距由试桩试验确定,即采取 3 种不同的桩间距 l (1.0 m,1.2 m,1.3 m)处理地基土后所获得的试验参数进行对比来确定,其结果见图 2。

由图 2 可知:(a)对于 δ_s ,当 l 设为 1.2 m 时能够完全消除黄土的湿陷性,满足设计要求;当 l 为 1.0 m 或 1.3 m 时不能完全消除黄土的湿陷性,不满足设计要求。(b)对于压实系数 η_c ,当 l 设为 1.2 m 时 η_c 均在 0.930 以上,满足规范和设计要求;当 l 设为 1.0 m 或 1.3 m 时部分地基土的 η_c 小于 0.850,不符合规范和设计的要求。

综上所述,当 l 设为 1.2 m 时,能满足工程设计的 δ_s 和 η_c 的要求。因此,本工程中土挤密桩的 l 设为 1.2 m。根据 JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》的规定及施工机械的具体情况,CFG 桩桩径取 500 mm, l 设为 1.2 m,有效桩长取 15 m,桩端落于第 5 层粉质黏土上,正三角形布桩,总桩数为 194 根,桩身混合料强度为

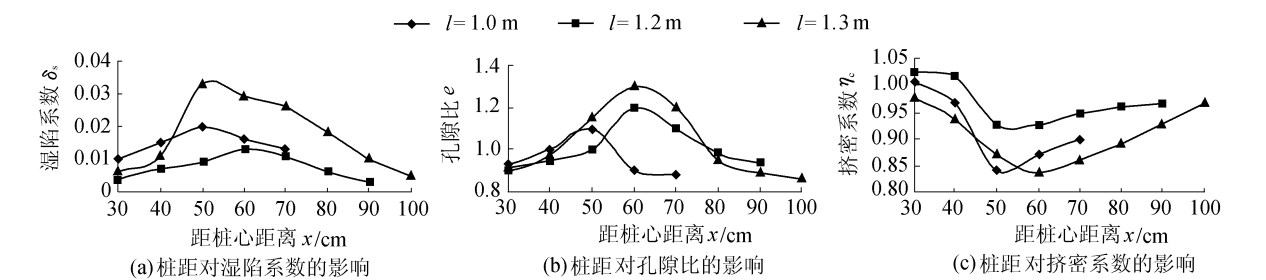


图2 试桩试验参数对比

Fig. 2 Contrast of test parameters

C20,褥垫层的厚度为250 mm。

施工过程中,先用沉管法进行土挤密桩施工,以消除黄土的湿陷性;然后用长螺旋钻孔法在土挤密桩之间插打 CFG 桩,提高地基的承载力。

3 复合地基检测分析

3.1 土挤密桩检测

土挤密桩检测包括:桩身质量检测、桩间土挤密效果和湿陷性检测。

a. 桩身质量检测。桩体夯填质量的检验按不少于2%进行,在施工过程中,从设计桩顶起每隔1.0 m 进行试验(轻型圆锥动力触探),测试其 η_c ,桩身 η_c 不宜小于0.97;经室内土工试验测定其他指标,见表2。

表2 室内土工试验结果									
Table 2 Laboratory soil test results									
桩号	埋深/m	$\omega/\%$	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	η_c	桩号	埋深/m	$\omega/\%$	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	η_c
第1排10号	-1	12.8	1.82	0.975	第12排15号	-1	9.5	1.83	0.974
	-2	12.4	1.82	0.972		-2	11.2	1.84	0.981
	-3	10.0	1.82	0.977		-3	10.5	1.84	0.973
	-4	11.5	1.83	0.973		-4	13.4	1.81	0.975
第3排24号	-1	11.4	1.82	0.981	第15排8号	-1	9.1	1.82	0.974
	-2	11.9	1.82	0.985		-2	13.4	1.80	0.981
	-3	11.6	1.81	0.978		-3	10.6	1.83	0.973
	-4	13.2	1.82	0.975		-4	10.1	1.82	0.975
第5排18号	-1	9.1	1.82	0.989	第18排20号	-1	12.4	1.81	0.994
	-2	11.5	1.83	0.981		-2	11.2	1.83	0.991
	-3	11.7	1.81	0.979		-3	11.1	1.80	0.993
	-4	11.5	1.83	0.985		-4	10.3	1.80	0.995
第7排12号	-1	11.6	1.82	0.977	第21排9号	-1	11.4	1.83	0.984
	-2	9.0	1.83	0.981		-2	10.6	1.80	0.981
	-3	12.1	1.81	0.983		-3	11.2	1.83	0.983
	-4	10.0	1.82	0.985		-4	11.5	1.82	0.985
第9排5号	-1	11.9	1.82	0.984	第23排14号	-1	13.2	1.82	0.978
	-2	12.7	1.83	0.981		-2	13.4	1.82	0.991
	-3	10.4	1.84	0.983		-3	11.4	1.80	0.983
	-4	10.9	1.83	0.985		-4	10.8	1.82	0.985

表2所示的结果表明,处理后桩体土的平均 ρ_d 均大于1.80 g/cm³, η_c 均大于0.970,满足设计要求。

b. 桩间土挤密效果和湿陷性检测。在地基处理范围内布置6个探井(部分探井位置见图3)进行取样,做常规的土工试验,试验结果见表3。探井开挖深度5.0 m,每间隔1.0 m取1件原状桩间土样。

表3表明:(a)土挤密桩桩间土的 η_c 最小值为0.938;挤密后 ρ_d 的最小值为1.78, δ_s 均小于0.015,全部消除了黄土湿陷性,满足工程规范和设计要求。(b) η_c 与 δ_s 呈负相关关系。

3.2 CFG 桩检测

CFG 桩的检测包括:(a)3根单桩竖向抗压静载荷试验及3组单桩复合地基静载荷试验的加载试验结果见表4和图4;(b)桩身完整性检测。

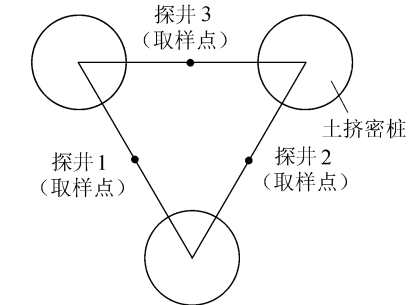


图3 桩间土取样位置

Fig. 3 Sampling sites of pile soil

表 3 对比试验结果

Table 3 Comparative soil test results

土样编号	状态	$\omega/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	e	压缩系数 a_{1-2}	δ_s	η_e
1	挤密前	22.9	1.36	1.002	0.26	0.038	0.947
	挤密后	8.2	1.78	0.755	0.12	0.012	
2	挤密前	20.7	1.57	0.722	0.20	0.022	0.960
	挤密后	10.3	1.82	0.650	0.10	0.009	
3	挤密前	25.5	1.51	0.797	0.23	0.028	0.970
	挤密后	12.2	1.86	0.586	0.15	0.007	
4	挤密前	21.3	1.60	0.694	0.25	0.036	0.956
	挤密后	14.1	1.83	0.554	0.12	0.010	
5	挤密前	21.5	1.62	0.671	0.22	0.025	0.968
	挤密后	16.3	1.79	0.515	0.16	0.008	
6	挤密前	17.2	1.42	0.913	0.47	0.038	0.938
	挤密后	14.2	1.81	0.684	0.18	0.013	

表 4 静载荷试验结果

Table 4 Static loading test results

单桩竖向抗压试验结果					单桩复合地基试验结果				
桩号	极限承载力/ kN	承载力 特征值/kN	沉降量/ mm	回弹量/ mm	桩号	极限承载力/ kN	承载力 特征值/kN	沉降量/ mm	回弹量/ mm
58	1700	850	25.21	14.74	66	800	400	14.86	6.06
113	1700	850	37.48	14.97	82	800	400	9.51	4.80
175	1700	850	11.42	6.42	144	800	400	9.68	4.03

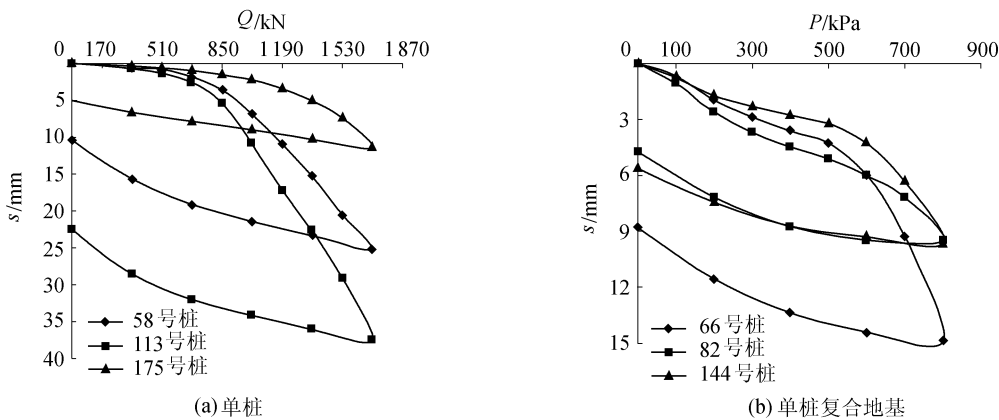


图 4 静载荷试验曲线

Fig. 4 Static loading test curves

由图 4(a)分析得知,3 根桩的桩顶施加荷载 Q 与桩顶施加荷载稳定后的沉降量 s 之间的关系曲线上均无判断极限承载力的拐点,其终止试验的条件均为最大加载值已加至设计承载力特征值的 2 倍。当荷载加至设计承载力特征值的 2 倍时,3 根桩中的最小沉降量为 11.42 mm,最大沉降量为 37.48 mm。按照 JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规范》有关规定,判定工程场地 58 号、113 号、175 号试验桩的单桩竖向极限承载力为 1700 kN,判定该工程场地的单桩竖向抗压承载力特征值为 850 kN,满足工程要求。

由图 4(b)分析得知,3 个测点的复合地基所施加的荷载 P 与 s 的关系曲线上均无判断比例界限荷载及极限荷载的拐点,其终止试验的条件均为最大加载压力已加至大于设计承载力特征值的 2 倍。当荷载加至大于设计承载力特征值的 2 倍时,3 个测点中的最小沉降量为 9.51 mm,最大沉降量为 14.86 mm。按照 JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》有关规定,确定该工程场地的单桩复合地基承载力特征值为 400 kPa,满足设计要求。

桩身完整性检测采用低应变测试方法进行,依据 JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规范》的规定本工程测试中 I 类桩占所测桩数的 99.48%,II 类桩占所测桩数的 0.52%,III 类、IV 类桩未发现。因此,CFG 桩完整性均为完整,满足工程设计要求。

综上所述,CFG 桩的单桩、复合地基承载力和桩身质量均符合要求。

4 结 论

a. 通过土挤密桩和 CFG 桩的检测,桩基各项参数指标均达到设计和规范要求,证实在本文工程中土挤密桩和 CFG 桩的各项参数设计值均合理。

b. CFG 桩的后续施工对桩间土进行二次挤密,在一定程度上使土体更加密实,同时使桩间土的挤密系数和湿陷系数有所改变。在两桩联合应用时,CFG 桩不仅可以提高承载力,还有挤密土体的作用。

c. 对地基采取整片处理时,多桩型复合地基应优先选用,这样不但减少了土挤密桩的桩长和施工难度,而且通过设置 CFG 桩可使地基土的承载力和变形符合要求。

参考文献:

- [1] 高明军,左威龙,李净一,等. 素混凝土桩复合地基在深厚软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2008, 36(1): 67-70. (GAO Mingjun, ZUO Weilong, LI Jingyi, et al. Application of plain concrete piles to treatment of deep and thick soft soil foundation[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(1): 67-70. (in Chinese))
- [2] 高炳鑫,王清. 大型储罐振冲碎石桩复合地基充水预压过程监测分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(5): 580-584. (GAO Bingxin, WANG Qing. Monitoring analysis of pre-compressed water filling of composite foundation with vibroflotation crushed stone piles for large scale storage tanks[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(5): 580-584. (in Chinese))
- [3] 代国忠,李文虎,林道富. 长短桩组合多元复合桩基技术的应用研究[J]. 岩土力学, 2007, 29(增刊): 640-644. (DAI Guozhong, LI Wenhui, LIN Daofu. Research on application of technology of composite pile foundation with short and long piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 29(Sup): 640-644. (in Chinese))
- [4] 张子新,郭志强,李昀. 组合型复合地基的理论分析与试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 725-727. (ZHANG Zixin, GUO Zhiqiang, LI Yun. Theoretical analysis and experimental research on combined composite foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 725-727. (in Chinese))
- [5] 丁继辉,袁满,王建国. 多桩型组合桩复合地基承载力的可靠度分析[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊2): 168-172. (DING Jihui, YUAN Man, WANG Jianguo. Reliability analysis on the bearing capability of composite foundation with multi-type compound piles[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Sup2): 168-172. (in Chinese))
- [6] 闫明礼,王明山,闫雪峰,等. 多桩型复合地基设计计算方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 352-355. (YAN Mingli, WANG Mingshan, YAN Xuefeng, et al. Study on the calculation method of multi-type-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 352-355. (in Chinese))
- [7] 崔激,闫澍旺,周宏杰. 多桩型复合地基的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 290-294. (CUI Wei, YAN Shuwang, ZHOU Hongjie. Load transfer behavior of multi-type-pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 290-294. (in Chinese))
- [8] 王明山,王广驰,严雪峰,等. 多桩型复合地基承载性状研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1142-1146. (WANG Mingshan, Wang Guangchi, YAN Xuefeng, et al. In-situ tests on bearing behavior of multi-type-pile composite subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1142-1146. (in Chinese))
- [9] 冯玉芹,王英浩. 多桩型复合地基抗液化分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(11): 80-82. (FENG Yuqin, WANG Yinghao. The anti-liquefaction analysis of multi-pile composite foundation[J]. Building Science, 2010, 26(11): 80-82. (in Chinese))
- [10] 陈强,黄志义,左人宇,等. 组合桩复合地基的特性及其 FEM 模拟研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(1): 50-55. (CHEN Qiang, HUANG Zhiyi, ZUO Renyu, et al. Behavior of combined composite ground and simulation study by FEM[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(1): 50-55. (in Chinese))
- [11] 王士杰,何满潮,李凤琴,等. 多桩型复合地基承载特性的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(5): 64-69. (WANG Shijie, HE Manchao, LI Fengqin, et al. Testing study on bearing characteristics of multi-type-pile composite foundation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(5): 64-69. (in Chinese))
- [12] 王士杰,何满潮,周瑞林,等. 多桩型复合地基试验研究[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(5): 118-122. (WANG Shijie, HE Manchao, ZHOU Ruilin, et al. Field test of multi-type-pile composite foundation[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006, 29(5): 118-122. (in Chinese))