

DOI: 10.11779/CJGE2022S2042

CFG桩和树根桩单桩承载力现场试验研究

王年香^{1,2}, 周春儿³, 吴加武³, 任国峰^{*1,2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 广东省航运规划设计院有限公司, 广东 广州 510050)

摘要:某码头堆场软土地基发生了推移, 针对不同区域, 分别采用 CFG 桩和树根桩桩网复合地基进行加固。通过 CFG 桩和树根桩单桩的现场静载试验, 研究了 CFG 桩和树根桩单桩承载性状, 对比了两者单桩竖向极限承载力试验结果, 分析了 CFG 桩和树根桩单桩承载变形差异。结果表明, CFG 桩和树根桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线存在明显拐点, 树根桩单桩竖向极限承载力要高于 CFG 桩, 极限承载力下树根桩的单桩刚度明显高于 CFG 桩, 最大荷载下桩顶最大沉降明显小于 CFG 桩。

关键词: CFG 桩; 树根桩; 承载性状; 变形差异; 现场静载试验

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0194-04

作者简介:王年香(1963—), 江西信丰人, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程基本理论和试验研究工作。E-mail: nxwang@nhri.cn。

Field tests on bearing capacities of CFG pile and root pile

WANG Nian-xiang^{1,2}, ZHOU Chun-er³, WU Jia-wu³, REN Guo-feng^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of

Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. Guangdong Province Planning and Design Institute for Water Transportation Co. LTD, Guangzhou 510050, China)

Abstract: For the soft soil foundation slipped in the storage yard of a wharf, the composite foundations with CFG pile and root pile net are used for reinforcement in different zones. The field static load tests are carried out to study the bearing behavior of the CFG pile and root pile. The test results of their vertical ultimate bearing capacities of single pile are compared. The bearing deformation difference between the CFG pile and the root pile is analyzed. The results show that there are obvious inflection points in the $Q-s$ curves of the static load tests on the CFG pile and root pile. The values of the vertical ultimate bearing capacity of the root pile are larger than those of the CFG pile. The stiffness of single pile of the root pile is significantly larger than that of the CFG pile under the ultimate bearing capacity, and its maximum settlement at pile top is obviously smaller than that of the CFG pile under the maximum loads.

Key words: CFG pile; root pile; bearing behavior; deformation difference; field static load test

0 引言

软土地基处理是新建港口码头、老旧堆场码头改造等工程建设的重点和难点, 其对地基变形要求十分严格。若地基处理不当, 后期在长时间高强度堆载下极易产生不均匀沉降等灾害, 严重影响码头和堆场等工程的正常使用。随着地基处理技术的发展, CFG 桩^[1-3]和树根桩^[4-6]桩网复合地基已成为有效的地基处理方式, 并被广泛应用于各工程领域软土地基处理中。

单桩承载特性决定桩网复合地基的承载力特性。众多学者通过室内模型试验、现场试验及数值模拟等方法研究单桩承载力特性。左宏亮等^[7]通过现场试验研究了螺杆灌注桩单桩竖向承载力, 实测结果比规范

计算得到的承载力要大。马天忠等^[8]通过室内模型试验研究了黄土地区单桩、4根和8根长短组合桩基础承载性状。郅彬^[9]等进行了 CFG 桩复合地基现场静载荷试验, 研究了复合地基承载性状和桩土间相互作用。

1 工程概况

某码头散货#16堆场地基采用真空联合堆载预压加固, 轨道梁基础和靠近南柳河侧岸坡均采用水泥搅

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y321006, Y321007)

收稿日期: 2022-12-08

***通信作者** (E-mail: gfren@nhri.cn)

拌桩复合地基加固。近期, 堆场沿堆场纵向中部发生往南柳河一侧的岸坡推移现象, 堆场产生了不同程度的损坏, 必须重新进行加固处理, 以满足一次性达到承载 350 kPa 的使用要求。

钻探资料显示, 堆场区地基土层自上而下为①₂素填土、②₁淤泥质黏土、②₂粉细砂、③₂中粗砂、③₄粉质黏土、④₁黏土及④₂黏土。表 1 列出了其主要物理力学性质指标, 软土地基不能满足堆场的变形和承载力要求, 采用桩网复合地基进行加固, 其中典型区采用插筋 CFG 桩, 推移区采用树根桩。

表 1 土的物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil				
土层	含水率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	厚度/m	
			典型区	推移区
① ₂ 素填土	32.0	1.91	2.5	2.9
② ₁ 淤泥质黏土	50.8	1.72	6.2	9.9
② ₂ 粉细砂		1.85		3.2
③ ₂ 中粗砂		1.85	2.0	
③ ₄ 粉质黏土	31.0	1.92	3.2	5.8
④ ₁ 黏土	42.3	1.77	3.2	1.5
④ ₂ 黏土	41.6	1.72		

典型区 CFG 桩和推移区树根桩分别进行了 3 根单桩竖向抗压静载试验, 以检验单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求。CFG 桩桩身强度 C30, 桩顶插入钢筋笼, 插筋长度≥5 m, 桩径 350 mm, 桩长 1 根 15 m、2 根 17 m。树根桩桩身强度 C30, 内插φ133 mm、壁厚 5 mm 的无缝钢管, 桩径 300 mm, 桩长 25 m。

试验采用快速荷载法, 加载分为 10 级, 每级荷载为预估极限承载力的 1/10, 其中第一级取分级荷载的 2 倍, 每级荷载施加后按第 5, 15, 30, 45, 60, 75 分钟测读桩顶沉降量, 某级荷载作用下, 试桩桩顶总沉降量超过 40 mm 时或桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍, 终止加载^[10]。

2 CFG 桩单桩承载性状

图 1 给出了 CFG 桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线, 由图 1 可知: ①荷载-沉降曲线初始阶段, 近似为直线, 且斜率较小。这阶段侧阻力随沉降的增大而线性增长, 端阻力未发挥作用。②荷载-沉降曲线非线性变化阶段, 随着荷载的增加, 沉降增量也逐渐增大。这阶段侧阻力随沉降增加非线性增长, 端阻力也逐渐发挥。③荷载-沉降曲线存在明显拐点, 拐点后沉降增量显著增大, 这阶段侧阻力和端阻力均已达到极限状态。

图 2 给出了 CFG 桩单桩静荷载试验 $s-lgt$ 曲线, 从图中可以看出, 荷载较小时, 沉降增量较小, $s-lgt$ 曲线较平缓, 随着荷载的增加, 沉降增量越来越大, s

-lgt 曲线越来越陡, 甚至出现明显向下弯曲。

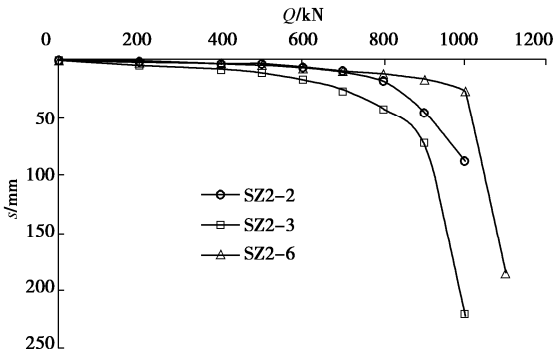


图 1 CFG 桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线

Fig. 1 $Q-s$ curves of static load tests on single CFG pile

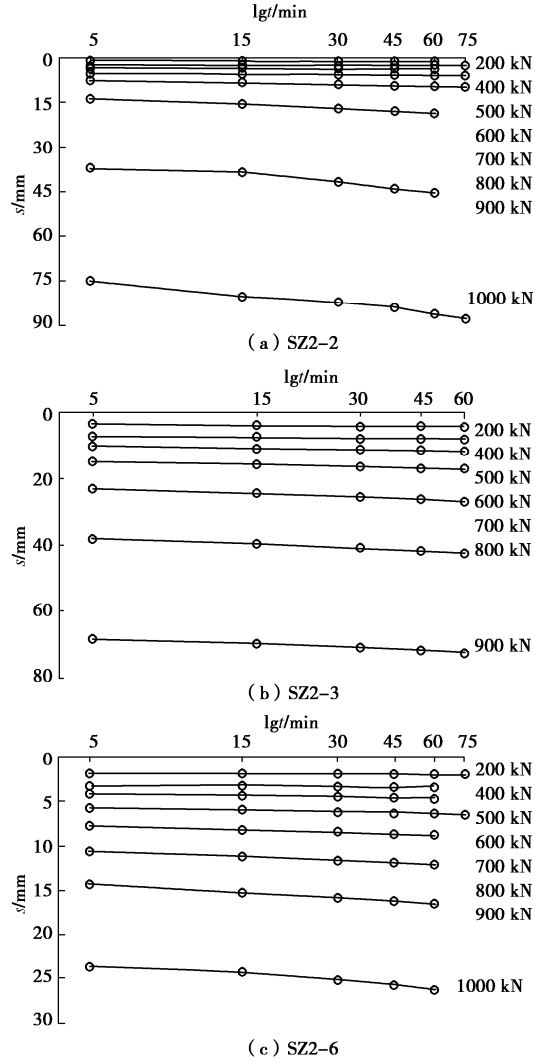


图 2 CFG 桩单桩静荷载试验 $s-lgt$ 曲线

Fig. 2 $s-lgt$ curves of static load tests on single CFG pile

根据《建筑基桩检测技术规范》^[11]建议的单桩竖向受压承载力确定方法, 取 $Q-s$ 曲线发生明显沉降的起点对应的荷载值或取 $s-lgt$ 曲线尾部明显向下弯曲的前一级荷载值作为单桩的竖向承载力, 综合分析图 1, 2, 3 根 CFG 桩单桩的竖向极限承载力分别 800, 800, 1000 kN, 见表 2。

表2 CFG桩单桩极限承载力

Table 2 Ultimate bearing capacities of single CFG pile		
桩号	桩长/m	极限承载力/kN
SZ2-2	15	800
SZ2-3	17	800
SZ2-6	17	1000

3 树根桩与 CFG 桩的对比

图 3 给出了树根桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线，图 4 给出了树根桩单桩静荷载试验 $s-lgt$ 曲线，树根桩的 $Q-s$ 曲线和 $s-lgt$ 曲线的变化规律与 CFG 桩基本一致。表 3 列出了树根桩单桩竖向极限承载力结果，对比表 2，3 可以看出，树根桩单桩竖向极限承载力要高于 CFG 桩。

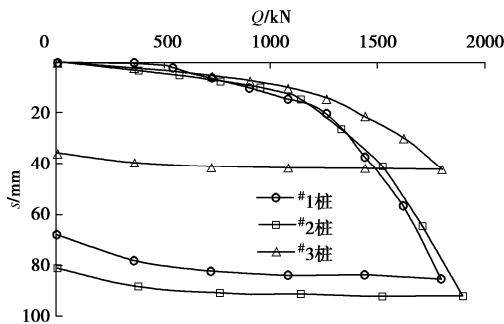
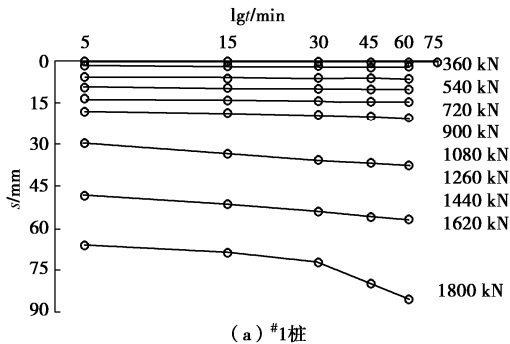
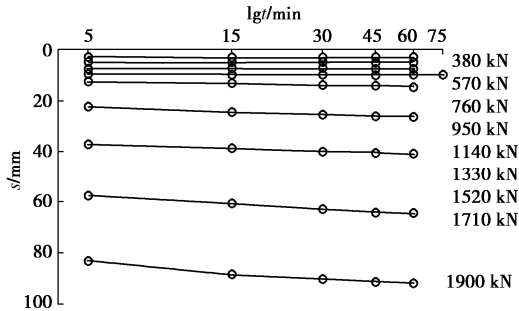


图 3 树根桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线

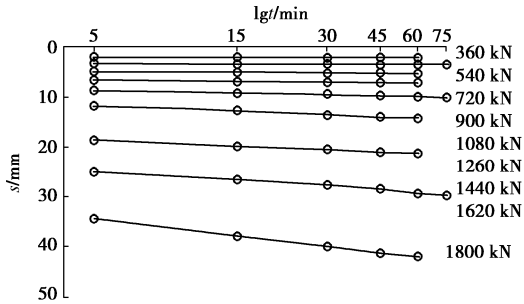
Fig. 3 $Q-s$ curves of static load tests on single root pile



(a) #1桩



(b) #2桩



(c) #3桩

图 4 树根桩单桩静荷载试验 $s-lgt$ 曲线

Fig. 4 $s-lgt$ curves of static load tests on single root pile

表3 树根桩单桩极限承载力

Table 3 Ultimate bearing capacities of single root pile			
桩号	#1 桩	#2 桩	#3 桩
极限承载力/kN	1260	1140	1260

表 4 列出了 CFG 桩和树根桩单桩静荷载试验极限承载力下单桩刚度，从此可以看出，CFG 桩的单桩刚度只有 19~43 kN/mm，均值为 33 kN/mm，树根桩的单桩刚度达 63~90 kN/mm，均值为 77 kN/mm，树根桩的单桩刚度明显高于 CFG 桩。

表 5 列出了 CFG 桩和树根桩单桩静荷载试验最大荷载下桩顶沉降，由此可知，CFG 桩的最大荷载只有 1100 kN，最大沉降却高达 200 mm，树根桩的最大荷载达 1900 kN，最大沉降却只有 92 mm，树根桩的最

表4 极限承载力下单桩刚度

Table 4 Stiffnesses of piles of under ultimate bearing capacity

CFG桩			树根桩		
桩号	沉降/mm	刚度/(kN·mm ⁻¹)	桩号	沉降/mm	刚度/(kN·mm ⁻¹)
SZ2-2	18.49	43.27	#1桩	19.97	63.09
SZ2-3	42.56	18.80	#2桩	14.43	79.00
SZ2-6	26.27	38.07	#3桩	13.96	90.26

表5 最大试验荷载下桩顶沉降

Table 5 Settlements at pile top under maximum test loads

CFG桩			树根桩					
桩号	最大荷载 /kN	最大沉降 /mm	桩号	最大荷载 /kN	最大沉降 /mm	最大回弹 /mm	残余沉降 /mm	回弹率/%
SZ2-2	1000	87.74	#1桩	1800	85.00	17.24	67.76	20.28
SZ2-3	1000	221.18	#2桩	1900	92.00	11.00	81.00	11.96
SZ2-6	1100	185.14	#3桩	1800	41.61	6.17	35.31	15.14

大沉降明显小于 CFG 桩。树根桩的最大回弹率为 20%。

4 结 论

(1) CFG 桩和树根桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线存在明显拐点。随着荷载的增加, 拐点前沉降增量缓慢增大, 拐点后沉降增量显著增大。树根桩单桩竖向极限承载力要高于 CFG 桩。

(2) 荷载较小时, CFG 桩和树根桩单桩静荷载试验 $s-lgt$ 曲线较平缓, 随着荷载的增加, $s-lgt$ 曲线越来越陡, 甚至出现明显向下弯曲。

(3) 极限承载力下 CFG 桩的单桩刚度为 19~43 kN/mm, 树根桩为 63~90 kN/mm, 树根桩明显高于 CFG 桩。

(4) CFG 桩试验的最大荷载只有 1100 kN, 桩顶最大沉降却高达 200 mm, 树根桩的最大荷载达 1900 kN, 最大沉降却只有 92 mm, 明显小于 CFG 桩。

参考文献:

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96 - 115. (LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96 - 115. (in Chinese))
- [2] 何 宁, 娄 炎, 娄 斌. CFG 桩复合地基加固桥头深厚软基[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 89 - 94. (HE Ning, LOU Yan, LOU Bin. Improvement of deep and thick soft foundation at the end of a bridge by using CFG pile composite foundation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 89 - 94. (in Chinese))
- [3] 李继才, 酆能惠, 丛 建, 等. 大型储罐 CFG 桩复合地基变形性状和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 1111 - 1116. (LI Ji-cai, LI Neng-hui, CONG Jian, et al. Deformation behaviors and variable rigidity design with equilibrium settlement for CFG pile composite foundation of large storage tanks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 1111 - 1116. (in Chinese))
- [4] 孙少锐, 吴继敏, 魏继红, 等. 树根桩加固边坡的稳定性分析与评价[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 776 - 780. (SUN Shao-rui, WU Ji-min, WEI Ji-hong, et al. Stability analysis and evaluation of slope reinforced with root piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 776 - 780. (in Chinese))
- [5] 王 辉, 陈剑平, 阙金声. 树根桩在基础加固中的设计与应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 2): 1290 - 1294. (WANG Hui, CHEN Jian-ping, QUE Jin-sheng. Research on design and application of root piles to Strengthening foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 1290 - 1294. (in Chinese))
- [6] 邱发波, 刘志强, 严松宏. 树根桩加固隧道软基的数值分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(2): 270 - 272. (QIU Fa-bo, LIU Zhi-qiang, YAN Song-hong. Numerical analysis of root pile in reinforcement tunnel basis[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, 34(2): 270 - 272. (in Chinese))
- [7] 左宏亮, 金宁政, 许成云. 黏性土地区螺杆灌注桩竖向承载力静载试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(2): 225 - 231. (ZUO Hong-liang, JIN Ning-zheng, XU Cheng-yun. Experiment on vertical bearing capacity of screw grout pile in cohesive area[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(2): 225 - 231. (in Chinese))
- [8] 马天忠, 朱彦鹏, 任永忠, 等. 黄土地区长短组合桩的承载力及变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 259 - 265, 92. (MA Tian-zhong, ZHU Yan-peng, REN Yong-zhong, et al. Bearing capacity and displacement characteristics of long-short composite piles in loess areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 259 - 265, 92. (in Chinese))
- [9] 郅 彬, 李 戈, 王永鑫, 等. CFG 桩复合地基承载性状试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(23): 100 - 102, 71. (ZHI Bin, LI Ge, WANG Yong-xin, et al. Experimental research on load-bearing property of CFG pile composite foundation[J]. Building Structure, 2017, 47(23): 100 - 102, 71. (in Chinese))
- [10] 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Technical Code for Composite Foundation: GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [11] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))

(编校: 孙振远)