

淤泥质土地区 CFG 桩复合地基沉降

朱瑞钧¹⁾ 高 谦¹⁾ 袁爱平¹⁾ 齐 干²⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 北京 100083

摘 要 运用 FLAC 软件对杭州开发区某办公楼复合地基沉降进行数值模拟, 结合工程实际对 FLAC 模拟结果进行了位移矢量和沉降分析, 并将数值模拟结果和实测沉降值进行对比. 在对数值模拟结果和实测数据进行深入分析的基础上, 总结出影响 CFG 桩复合地基沉降的主要因素. 分析发现桩土相互作用、桩的设置、载荷时间关系和土层应力分布对复合地基沉降影响显著.

关键词 CFG 桩; 沉降; 复合地基; 数值模拟

分类号 TU 473

复合地基是在天然地基中设置一定比例的增强体, 并由土体和增强体共同承担上部荷载的一种人工地基, 是处理软弱地基土的有效手段, 已在软弱土地区得到广泛应用^[1]. 水泥土搅拌桩复合地基在 20 世纪 40 年代最初由美国研制而成. 1974 年日本港湾技术研究所等单位又合作开发研制出水泥搅拌固化法, 用于加固钢铁厂矿石堆场地基. 70 年代以后混合掺料搅拌桩处理软弱地基土技术相继出现, 世界各地大量涌现处理软弱土的各类复合地基工程. CFG 桩是由碎石、石屑、砂石和粉煤灰掺适量水泥加水搅拌而成, 由中国建筑科学研究院地基研究所研制成功. 大量工程实践证明, CFG 桩复合地基工程具有造价低、易于取材、技术可靠的特点, 广泛用于处理高层建筑软弱地基. 复合地基的设计原则是要同时满足强度控制和沉降变形要求. 复合地基理论和实践的发展将进一步促进地基处理水平的提高^[2]. 本文结合工程实践对 CFG 桩复合地基沉降进行了详细的分析.

1 CFG 桩复合地基沉降原理

CFG 桩复合地基变形原理见图 1. 图 1(a) 为荷载 $P=0$ 时的变形状态^[3]. 当地基加载后 ($P>0$), 假设桩顶发生的沉降量为 S_a , 地基土表面发生沉降为 S_o , 桩端处桩的沉降为 S_p . 由于桩的弹性模量远比土的模量大, 所以桩比土的变形小^[4]. 在通常条件下, 竖向荷载引起桩体的压缩变形可忽略不计, 可认为桩任一断面处的位移与桩顶位移相等, 即有

$$S_p = S_a.$$

假定桩端处土的位移为 S_s . 由图 1 可知: 桩间土上部变形量为 $S_u = S_o - S_a$, 桩间土下部变形量为 $S_d = S_p - S_s$, 桩长 Z_a 范围内土体的压缩变形量 $S_1 = S_u + S_d = S_o - S_s$, CFG 桩复合地基下卧层的压缩变形量 $S_2 = S_o - S_1$, 褥垫层的压缩变形量 $S_3 = H_o - H_s$. 其中 H_o 为受载前垫层厚度, H_s 为受载后垫层厚度. 地基基础总的沉降量 $S = S_1 + S_2 + S_3$.

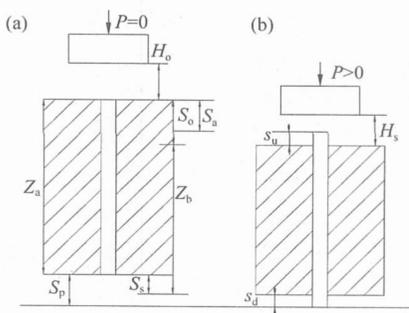


图 1 复合地基沉降示意图

Fig. 1 Settlement of composite foundation

2 工程实例

2.1 工程概况

本工程办公楼位于杭州市开发区, 占地面积 4700 m^2 , 上部结构设计为 10 层. 建筑场地内土层以第四系浅海相沉积淤泥质土为主, 地下水位为 -1.0 m , 土体的物理力学指标见表 1. 由于下部土层较弱, 不符合承载力要求, 必须要进行地基处理. 设计单位经综合考虑, 本工程地基处理采用 CFG 桩方案. 桩长设计为 16.5 m , 桩径为 400 mm ,

收稿日期: 2005-12-22 修回日期: 2006-04-04

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(No. 200117)

作者简介: 朱瑞钧(1976-), 男, 博士研究生; 高 谦(1956-), 男, 教授, 博士生导师

在建筑条形基础下布设双排桩, 桩的纵向间距为 1.2 m, 桩的横向间距 2.0 m, 基础埋深为 1.2 m, 采

用长螺旋压灌法成桩. 根据上部建筑使用要求, 复合地基沉降应控制在 100 mm 以内.

表 1 土体的物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical indexes of the soil

层号	地层名称	土层厚度/m	密度/ (kg·m ⁻³)	内聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	压缩模 量/MPa	承载力特 征值/kPa
1	杂填土	0.60	19.0	4.0	0.0	22.3	—
2	粉质粘土	1.45	18.2	8.0	7.0	18.4	90
3	淤泥质土	12.40	17.5	6.0	4.0	29.6	65
4	粉质粘土	4.50	18.6	11.5	18.4	19.3	150
5	粘土夹砂	9.25	18.8	10.3	16.5	20.2	170
6	粉质粘土夹粉土	7.62	18.5	10.9	15.2	20.7	125

2.2 复合地基沉降监测

由于本工程地基土较软弱且淤泥质土分布较厚, 为全面了解地基处理后复合地基沉降情况, 在建

筑物上布设了 12 个观测点, 并连续进行了为期 5 个月的复合地基沉降监测. 详细沉降观测数据见表 2.

表 2 复合地基沉降观测数据
Table 2 Measured data of composite foundation settlement

观测时间/d	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
观测沉降值/mm	8.2	16.3	25.1	33.3	44.8	55.6	58.4	59.2	60.3	61.2

3 数值模拟及结果分析

3.1 模型的构建

本研究采用 FLAC^[5] 来模拟 CFG 桩复合地基沉降. 目标模型为复合地基土和 CFG 桩体, 地基土是塑性体, 模拟时选用摩尔-库伦准则, 桩体为弹性体. 为了能较真实地模拟 CFG 桩复合地基受力沉降, 模型区域设定为宽度 30 m, 深度 40 m. 由于建筑地基为条形基础, 地基下布设的是双排 CFG 桩, 模拟的 CFG 桩取纵向双排桩. 土体参数的选取按表 1 所示, CFG 桩体的参数为密度为 20 kg·m⁻³, 桩径为 400 mm, 桩间距按纵向间距 1.2 m, 桩长为 16.5 m, 上部均布荷载为 P=1.0 MPa. 模型两侧限制水平位移, 底端固定.

3.2 复合地基位移矢量模拟

受载后复合地基位移矢量场模拟结果见图 2. 地基土最大沉降为 48.5 mm, 桩间土的沉降为 20.6 mm. 受载后复合地基土两侧淤泥质土层的位移矢量变化明显, 桩间土位移矢量变化较小, 只在 2.2 m 深度范围有小幅变化. 这与工程实际较为接近. 本工程淤泥质土层埋深浅, 厚度大, 土体软弱, 压缩性大, 两侧土体受桩体挤密较轻, 相对于桩间土受力大得多, 因此发生的沉降较大. 图 2 可见, 淤泥质土下部土层位移矢量变化很小, 因为淤泥土

层厚度达 12.5 m, 复合地基受载后附加应力沿深度不断扩散, 到下部土层时附加应力已很小, 因此发生的沉降很小.

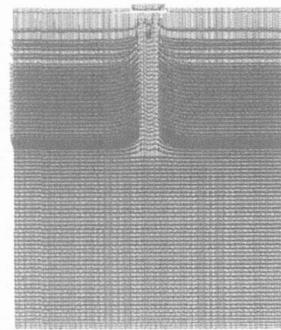


图 2 复合地基位移矢量场

Fig.2 Displacement vector field of composite foundation

3.3 复合地基沉降模拟

由图 3 可见, 复合地基受载后最大沉降位于桩外侧地基土层, 最大沉降量为 48.5 mm, 而且发生的沉降主要由淤泥质土层压缩变形引起. 桩间土的沉降量为 20.6 mm, CFG 桩体沉降最小, 只有 12.1 mm. 桩间土的沉降量只为外侧地基土的 42%. 桩间土的沉降远小于桩外土层, 主要是由以下因素造成: 经过地基处理后, 桩间土受到振动, 土颗粒重新排列, 使桩间土得以挤密^[6], 土体的压缩

性降低；其次，复合地基中桩与桩间土存在负摩阻力，使得桩间土的横向变形受到桩的约束，沉降受到限制。表 2 中，复合地基最大沉降监测值为 61.2 mm，FLAC 数值模拟最大沉降值为 48.5 mm。比较发现两者偏差较小，说明 FLAC 模拟结果与工程实际沉降较为吻合。

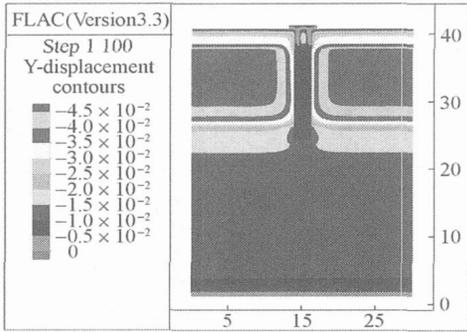


图 3 复合地基沉降图(单位:m)

Fig.3 Settlement of composite foundation(unit:m)

4 CFG 桩复合地基沉降分析

通过 FLAC 数值模拟和对地基沉降监测数据进行仔细分析发现，桩土相互作用、桩的设置情况、荷载时间关系和土层应力分布对 CFG 桩复合地基沉降有较大的影响。以下结合实测沉降数据和数值模拟结果对其进行详细的分析。

4.1 荷载时间关系对复合地基沉降的影响

CFG 桩复合地基的沉降固结有特殊的发展过程。加载初期地基土处于弹性状态，沉降呈线性增长^[7]。当上部荷载不断增大时，荷载主要由桩体来承担，造成桩体向上刺入褥垫层及向下刺入下卧土层，此时地基土塑性区快速扩张，沉降不断增加。当上部加载达到稳定状态时，由于地基土尚未完全固结以及土体的蠕变性，土体沉降缓慢增加并逐渐达到稳定状态，因此土体蠕变是引起工后沉降的主要原因之一^[8]。由图 4 可见，前 60 d 复合地基沉降呈直线增加，60 d 时荷载为 0.69 MPa 沉降量为 33.4 mm，此时地基土处于弹性状态。随上部施工继续进行，复合地基沉降呈曲线增加，塑性区快速扩张沉降速度明显快于前一阶段，90 d 时荷载为 0.94 MPa，沉降量为 56.3 mm，达到稳定状态的 92%。110 d 的主结构施工期结束后，沉降非常缓慢的进行，并逐渐达到稳定固结状态。可见荷载-时间关系对复合地基沉降有较大影响。

4.2 土层应力分布对复合地基沉降的影响

由图 2 可见，复合地基受载后应力主要集中在厚度较大的淤泥质土层；而图 3 中，地基土绝大

部分沉降发生于淤泥质土层。因为本工程淤泥质土层分布较厚，土体压缩性强，应力分布较集中，因此发生的沉降较大。图 3 中，淤泥质土底部土层沉降很小，下部粉质粘土层和粘土夹砂层的沉降量分别为淤泥质土层的 28% 和 19%。因为加载时土体中的附加应力随深度逐渐扩散，加之本工程淤泥质土层较厚，扩散到底层土时附加应力已很小，因此沉降很微弱。可见，土层应力分布是影响 CFG 桩复合地基沉降的重要因素。

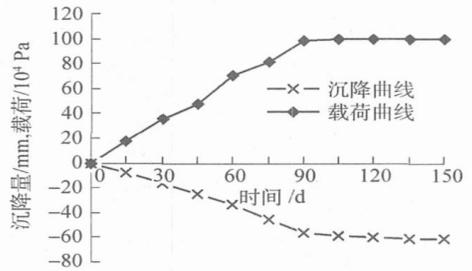


图 4 加载-沉降-时间关系曲线

Fig.4 Relation curves of load and settlement with time

4.3 桩土相互作用对复合地基沉降的影响

通过在桩土与基础间设置适当厚度的垫层，可较好调节桩土荷载分担比，达到充分发挥桩间土承载力的目的^[9]。加载初期桩间土的承载力首先得到发挥，承担的荷载较大^[10]。由图 5 可见，加载至 0.4 MPa 前桩土荷载分担比成比例增加，此时土体处于弹性变形阶段，地基土沉降呈直线递增。当荷载超过 0.4 MPa 后荷载分担比开始呈曲线快速增加，桩体承担的荷载逐渐增大，由于土体受压较小仍

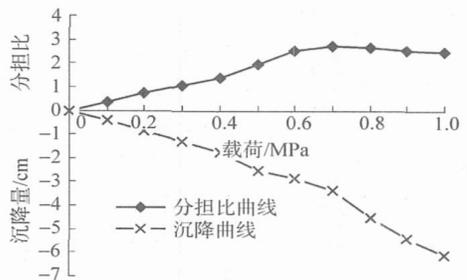


图 5 荷载-桩土分担比-沉降关系曲线

Fig.5 Relation curves of settlement and pile-to-soil load ratio with load

处于弹性压缩变形。当加载到 0.7 MPa 时桩土荷载分担比达到峰值 2.72，土体弹性压缩变形也基本完成。超过 0.7 MPa 后荷载分担比逐渐下降，土体开始塑性扩张，沉降加剧。加载到 1.0 MPa 后荷载分担比稳定在 2.46，地基土以蠕变的形式继续沉降并逐渐达到稳定固结状态。复合地基加载后，桩与周

围土体间形成了相对位移,从而在桩体一定深度范围内出现负摩阻力,桩间土的沉降受到约束,限制了桩间土的沉降.可见,桩土相互作用对 CFG 桩复合地基沉降有较大的影响.

4.4 桩的设置情况对复合地基沉降的影响

桩的设置对复合地基沉降的影响,主要体现在桩长、置换率和布桩型式对地基沉降的影响.桩长设计不同,受载时桩土载荷分担比差别较大.桩越短,桩间土荷载分担比越大,桩间土承担荷载越大,桩间土的沉降也越大.桩过长作用并不明显,由图 3 可知,复合地基 90% 的沉降发生在 14.5 m 深度内,往下沉降很小,因此设计中要合理选择桩长.合适的置换率可充分发挥桩与周围土的承载潜力,过大的置换率桩间土承载力得不到发挥,而置换率较小桩间土的性能得不到有效改善,理想的置换率应是桩间土的性能得到改善,桩土能以协调变形的形式共同承担上部荷载.图 3 中,桩与桩间土的沉降差为 8.5 mm,通过协调变形共同承担上部荷载.复合地基桩型布置不同,往往会产生群桩效应,进而加剧地基沉降.

5 结论

(1) 经过 CFG 桩复合地基处理,桩间土得以挤密,桩与土的承载潜力均得到有效发挥,桩土以协调变形的形式共同承担上部荷载,地基的沉降大幅度减少.

(2) 复合地基土的绝大部分沉降发生于桩体范围内的淤泥质土层.由于土层中的附加应力随深度

逐渐扩散,下部土层沉降很微弱.地基土沉降过程桩土间形成相对位移并出现负摩阻力,桩间土沉降受到限制.

(3) 通过对沉降监测和数值模拟结果比较分析发现,桩土相互作用、桩的设置、载荷时间关系和土层应力分布对复合地基沉降有着重要的影响.工程设计中应合理考虑它们的影响,以期达到理想的实际效果.

参 考 文 献

- [1] 董必昌,郑俊杰. CFG 桩复合地基沉降计算方法研究. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(8): 1084
- [2] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 3
- [3] 阎明礼,张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 93
- [4] 冯震,王连俊,许兆义. CFG 桩竖向荷载作用下水平位移和弯矩的试验研究. *土木工程学报*, 2005, 38(2): 92
- [5] FLAC-2D(3.3) User's Manual. Minnesota: Itasca consulting Group Inc, 1996: 52
- [6] 党昱敬. CFG 桩和沉管挤密碎石桩组合型复合地基的承载力. *工业建筑*, 1997, 27(3): 14
- [7] 王凤池,朱浮声,康玉梅,等. 复合地基沉降的模型预测. *东北大学学报: 自然科学版*, 2004(10): 1011
- [8] 张仪萍,俞亚南,周宏伟. 桥头粉喷桩复合地基工后沉降原因分析. *岩土力学*, 2006, 27(7): 1174
- [9] 韩云山,白晓红,梁仁旺. 垫层对 CFG 桩复合地基承载力评价的影响研究. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20): 3501
- [10] 朱明双,王金昌,朱向荣. 路堤荷载下现浇筒桩复合地基性状分析. *浙江大学学报: 工学版*, 2006, 40(12): 2189

Settlement of CFG pile composite foundation in silt soil region

ZHU Ruijun¹⁾, GAO Qian¹⁾, YUAN Aiping¹⁾, QI Gan²⁾

1) Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Mechanics and Civil Engineering School, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

ABSTRACT Composite foundation settlement of an office building in Chinese Hangzhou development region was numerically simulated with FLAC software. According to engineering practice, displacement vector and settlement analyses on the simulated results were carried out, and the calculated settlements were compared with the measured ones. On the basis of the research on the numerical simulation results and measured settlement data, main factors influencing CFG pile composite foundation settlement were summarized. It is found that composite foundation settlement was obviously affected by pile-soil interaction, pile setting, load-to-time relation and soil stress distribution.

KEY WORDS CFG pile; settlement; composite foundation; numerical simulation