

长短桩组合多元复合桩基技术的应用研究

代国忠¹, 李文虎¹, 林道富²

(1. 常州工学院 土木建筑工程学院, 常州 213002; 2. 常州市第一人民医院基建办, 常州 213003)

摘 要: 论述了长短桩组合多元复合桩基的设计原理, 分析了复合桩基承载力和地基沉降的计算方法。并结合灰砂桩与 CFG 桩组合桩基处理工程实例, 介绍了按长短桩多元复合桩基设计计算、施工技术和处理效果。实践证明, 长短桩复合桩基组合形式多样, 不受桩型选择限制, 可实现单元组合或多元组合, 它能充分发挥桩间土、短桩和长桩三者的潜能, 大幅度地减少了长桩的用量, 确保地基承载能力, 并可有效地控制基础整体沉降和差异沉降, 其应用前景广阔。

关 键 词: 长短桩; 复合桩基; 承载力; 沉降量

中图分类号: TU 472.3

文献标识码: A

Research on application of technology of composite pile foundation with short and long piles

DAI Guo-zhong, LI Wen-hu, LIN Dao-fu

(1. School of Civil Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China

2. Construction office, First People's Hospital of Changzhou, Changzhou 213003, China)

Abstract: The design philosophy, calculational methods of bearing capacity and settlement of multi-element composite pile foundation with long and short piles are discussed. Meanwhile, taking foundation treatment engineering of compounding with lime-sand pile and CFG pile for example, the design, construction technique and treating effect on it are described. Engineering practice shows that, the composite pile foundation with long and short piles has multifarious compounding form, which do not restrict types of piles, which can actualize single-element or multi-element compounding, and so it can make full use of the potentials of soil and long and short piles. Long and short piles foundation demands fewer long piles, but it can effectively improve foundation bearing capacity; and it can control the average settlement and differential settlement; effectively, therefore, it will be very immensity foreground of engineering practice.

Key words: long and short piles; composite pile foundation; bearing capacity; settlement

1 前 言

对于各类刚性桩、半刚性桩及柔性桩基工程, 在满足建筑地基基础工程设计要求的前提下, 如何降低桩长, 减少桩数是近年来岩土工程界探索热门课题^[1-6]。如上海、杭州等地近年来采用控制沉降复合桩基, 即长短桩多元复合桩基技术, 较充分地利用了地基土承载力, 经济效益明显^[7]。

长短桩多元复合桩基(或称之为复合地基)由长桩、短桩、天然地基土和褥垫层四部分共同组成, 如图 1 所示。长短桩复合地基充分发挥了桩间土、长桩和短桩三者的潜能, 可以大幅度提高地基承载

力, 减少地基沉降, 具有工程应用推广价值。

长桩长度 $L \geq 8$ m, 桩端坐落在较深的持力层中, 其作用不仅是提高地基承载力, 且可通过桩身将荷载向地基深处传送, 减少压缩层变形, 即起到减沉和控制地基变形的作用^[8]。长桩一般选用刚性桩、半刚性桩, 如预应力管桩、钢筋混凝土灌注桩、混凝土桩、CFG 桩、灰砂桩等。

短桩长度 $L = 3 \sim 10$ m, 桩端坐落在较浅的持力层中, 主要用来提高地基承载力, 加固桩间土, 增加长桩桩体摩阻力等。短桩可选用石灰桩、石灰砂桩、灰砂桩、灰土桩、CFG 桩、水泥土搅拌桩(或粉喷桩)、高压旋喷桩、砂桩、碎石桩、夯实水泥土

桩等半刚性桩或柔性桩。

在复合桩基和建筑物基础底面之间铺设砂石褥垫层 (20~40 cm), 用以调节桩与土之间的荷载分配, 当桩间距过大时, 褥垫层厚度可适当加大。褥垫层材料可采用粗中砂、碎石、级配砂石, 并应限制最大粒径。

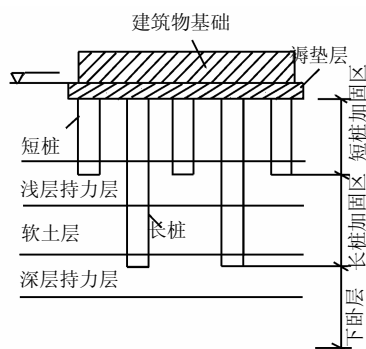


图1 长短桩组合多元复合桩基示意图

Fig.1 Sketch of composite pile foundation with long and short piles

长短桩复合桩基可通过调整长桩和短桩的长度、刚度、布置形式、桩间距及褥垫层厚度等参数来满足地基承载力和沉降量的要求, 具有较大的灵活性, 且长桩的单桩承载力设计值可达到极限承载状态^[9]。该设计方法拓展了各类桩基构成的复合地基适用范围, 可适用于各种高层及超高层建筑软土地基的处理, 特别适用于软硬互层地基, 上部有一层浅持力层, 但坚硬持力层距地面较深的情况^[10]。

2 长短桩组合多元复合桩基计算方法

2.1 多元复合桩基承载力计算

若长桩与短桩桩型不同, 利用面积加权原理, 可推导出多元复合桩基承载力特征值, 即

$$f_{spk} = m_1 \frac{R_{a1}}{A_{p1}} + \beta_1 m_2 \frac{R_{a2}}{A_{p2}} + \beta_2 (1 - m_1 - m_2) f_{sk} \quad (1)$$

式中: f_{spk} 为多元复合桩基承载力特征值 (kPa); f_{sk} 为桩间土承载力特征值 (kPa); m_1 、 m_2 分别为长桩和短桩的面积置换率, 均为相对天然地基上的置换率; R_{a1} 、 R_{a2} 分别为长桩和短桩的单桩承载力特征值 (kN), 其值可根据静载试验确定, 或由桩的类型相应的计算方法求得; A_{p1} 、 A_{p2} 各为长桩和短桩横截面积 (m^2); β_1 、 β_2 分别为短桩和桩间土承载力折减系数 (强度发挥系数), 与桩类型有关。

一般情况下, 当长桩达到极限承载力时, 短桩和桩间土并未达到极限承载状态。实际工程中很少有长桩、短桩和桩间土三者同时达到极限承载力状

态的情况, 若发生这种情况, 可令 $\beta_1 = \beta_2 = 1$ 。对于具体工程, β_1 、 β_2 的取值可根据工程经验估计, 也可通过现场载荷试验实测数据求得^[11]。

若长桩与短桩桩型相同, 且等间距对称布置, 可假定长、短桩承载力相等, 按单元复合地基进行计算, 见《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2002。

2.2 多元复合桩基沉降计算

长短桩组成的多元复合桩基总沉降量可采用分层的形式计算。

如图1所示, 总沉降量 s 由三部分组成^[12]: 短桩加固区内土层沉降量 s_1 , 短桩端部到长桩端部 (长桩加固区) 内土层沉降量 s_2 , 以及长桩端部以下的下卧层土层沉降量 s_3 。即有:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (2)$$

加固区土层沉降量 s_1 和 s_2 计算时地基的压缩模量采用复合模量, 按分层总和法计算公式为:

$$s_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\Delta p_i}{E_{csi}} H_i \quad (3)$$

$$s_2 = \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \frac{\Delta \sigma_{sj}}{E_{csj}} H_j \quad (4)$$

$$E_{csi} = m_1 \mu_1 E_{p1} + m_2 \mu_2 E_{p2} + (1 - m_1 - m_2) E_{si} \quad (5)$$

$$E_{csj} = m_1 \mu_1 E_{p1} + (1 - m_1) E_{sj} \quad (6)$$

式中: Δp_i 为短桩加固区第 i 层复合土层附加应力增量 (kPa); H_i 为短桩加固区第 i 层复合土层厚度 (m); H_j 为长桩加固区第 j 层复合土层厚度 (m); μ_1 、 μ_2 各为长桩和短桩桩体模量发挥系数 (<1), 由现场测试或按经验取值; n_1 为短桩桩长范围内土的分层数; n_2 为整个加固区范围内的分层数; E_{csi} 为短桩加固区第 i 层土复合模量 (kPa); E_{csj} 为长桩加固区第 j 层土复合模量 (kPa); $\Delta \sigma_{sj}$ 为扣除长桩承担荷载后, 短桩和桩间土上应力 σ_s 在长桩加固区第 j 层土产生的平均附加应力增量 (kPa); E_{p1} 、 E_{p2} 各为长、短桩桩体压缩模量 (kPa); E_{si} 、 E_{sj} 各为第 i 、 j 层土压缩模量 (kPa)。

s_3 的计算采用分层总和法即可, 其下卧层的附加应力有应力扩散法、等效实体法和改进 Geddes 法等, 可根据长短桩的刚度和布置形式选择。如果长短桩桩顶设置了褥垫层, 在计算总沉降量时还应考虑褥垫层的压缩量^[13]。

3 长短桩组合多元复合桩基工程应用

灰砂桩由生石灰、砂、水泥组成, 是一项地基

处理新技术,可在增强桩身粘结强度和刚度的前提下,解决石灰桩桩心软化问题。灰砂桩属于半刚性桩,可用来处理建筑基础地基,也可用来处理道路的路基,其工程应用效果比较好^[14-19]。

CFG 桩是水泥粉煤灰碎石桩的简称,它由碎石、石屑、粉煤灰、适量水泥加水拌合而成。CFG 桩的桩身强度高、刚度大,属刚性桩范围。

将 CFG 桩和灰砂桩组合起来使用,并按长短桩非线性多元复合桩基进行设计,可实现地基基础设计方案的优化。以哈尔滨市某商厦为例,介绍灰砂桩与 CFG 桩组成的多元复合桩基设计方案及工程应用效果。

3.1 工程概况

哈尔滨市某商厦地面以上 12 层,建筑占地面积为 $40\text{ m} \times 70\text{ m}$,总建筑面积为 $32\,000\text{ m}^2$,基础采用筏板基础,筏板厚度 0.9 m ,筏板底面埋深 1.6 m ,基底荷载设计值为 300 kPa 。

3.2 工程地质情况

根据工程地质勘察报告,该建筑物地基土自上而下为:

① 杂填土:厚度 $0 \sim 1.5\text{ m}$,为建筑垃圾及填土;

② 粉质粘土:厚 $1.5 \sim 7\text{ m}$,可塑~硬塑状态, $a_{1-2} = 0.26\text{ MPa}^{-1}$, $f_{sk} = 140\text{ kPa}$, $E_s = 6.3\text{ MPa}$;

③ 粘土:厚 $7 \sim 14\text{ m}$,可塑,中压缩性土, $a_{1-2} = 0.20\text{ MPa}^{-1}$, $f_{sk} = 200\text{ kPa}$, $E_s = 6.8\text{ MPa}$;

④ 泥岩:埋深 $14 \sim 20\text{ m}$,致密坚硬,上部有微风化, $f_{ak} = 2\,000\text{ kPa}$, $E_s = 20\text{ MPa}$ 。

场地地下水主要是赋存在第四系的上层滞水,水位 $2.0 \sim 3.5\text{ m}$ 。

3.3 地基基础设计方案的选择

因与筏板基础接触的地基为粉质粘土,其天然地基承载力不足,需对该持力层进行加固处理。通过方案论证和计算,该工程采用长短桩组合的多元复合桩基设计方案最佳,其复合桩基承载力特征值为 $f_{spk} = 300\text{ kPa}$ 。

短桩采用灰砂桩,桩长 6 m ,孔径 $\phi 400\text{ mm}$,桩间距 1.0 m ,正方形布置,主要用于提高复合地基的承载力。长桩采用 CFG 桩,桩长 13 m ,孔径 $\phi 400\text{ mm}$,桩间距 1.0 m ,正方形布置,主要用于控制沉降。在复合桩基和基底之间,铺设 0.3 m 厚度的砂石垫层。场地桩位布置如图 2、图 3 所示。

3.4 复合桩基设计计算

(1) 单桩承载力特征值确定

现场静载试验测得短桩(灰砂桩)的单桩承载力特征值为 85 kN ;长桩(CFG 桩)的单桩承载力

特征值为 230 kN 。对于灰砂桩,其单桩承载力特征值可取下列二式计算结果较小者。

$$R_{a2} = u \sum q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (7)$$

$$R_{a2} = \eta f_{cu} A_p \quad (8)$$

结合本工程,以上二式各参数取值如下:

$q_{si} = 1.1 \times 26 = 28.6\text{ MPa}$; $l_i = 6\text{ m}$; $\alpha = 0.6$; $q_p = 200\text{ MPa}$; $A_p = 1.1 \pi d^2 / 4 = 0.1382\text{ m}^2$; $\eta = 0.50$; $f_{cu} = 1250\text{ kPa}$ 。

计算得: $R_{a2} = 86.4\text{ kN}$; 实取 $R_{a2} = 85\text{ kN}$ 。

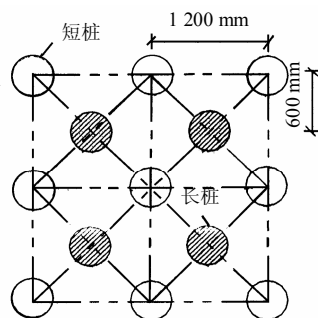


图 2 复合桩基的桩位平面布置
Fig.2 Plan of layout of piles of composite pile foundation

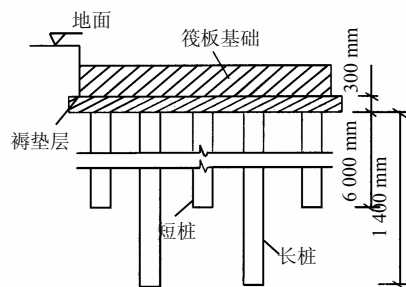


图 3 复合桩基的桩位剖面布置
Fig.3 Section disposal of piles on composite pile foundation

(2) 复合桩基承载力特征值确定

根据公式(1)计算,有关参数取值如下:

$m_1 = m_2 = 0.4^2 / (1.13 \times 1.2)^2 = 0.087$; $f_{sk} = 1.1 \times 140 = 154\text{ kPa}$; $\beta_1 = 0.9$; $\beta_2 = 0.85$; $R_{a1} = 230\text{ kPa}$; $R_{a2} = 85\text{ kPa}$; $A_{p1} = \pi d^2 / 4 = 0.1256\text{ m}^2$; $A_{p2} = 1.1 \pi d^2 / 4 = 0.1382\text{ m}^2$ 。

则有: $f_{spk} = 315.3\text{ kPa} > 300\text{ kPa}$,满足复合桩基承载力的设计要求。

(3) 复合桩基沉降的计算

按前述多元复合桩基沉降计算公式计算,该工程地基的总沉降量为 9 mm 。

3.5 施工技术

(1) 灰砂桩施工

灰砂桩的体积比为: 石灰:砂子:水泥 = 5: 4: 1。生石灰的粒径 ≤ 5 cm, 活性氧化钙含量 $> 80\%$ 。砂子为中粗砂, 过筛除去砂中的卵石、碎石、泥块等, 含泥量应 $\leq 6\%$ 。

本工程采用长螺旋回转钻机在土中成孔, 成桩时分段夯实混合料, 每段 1.0 m, 桩底投 20 cm 厚中砂, 顶部 0.5 m 采用水泥黏土夯实封顶。

控制投料量不少于桩孔体积的 1.4 倍(即充盈系数 ≥ 1.4), 保证桩身填料的密实度, 提高桩身强度, 避免发生桩体“软心”现象。

(2) CFG 桩施工

CFG 桩的配合比, 按配制 1 m^3 桩身混合料计算, 需加水 187 kg, 水泥 88 kg, 粉煤灰 217 kg, 石屑(粒径 ≤ 10 mm) 512 kg, 碎石 1 194 kg。

采用长螺旋钻孔、管内泵压混合料灌注成桩的方法施工 CFG 桩。亦可采取振动沉管法灌注成桩。

(3) 垫层铺设

待灰砂桩和 CFG 桩全部施工完毕, 挖除地表填土至地坪标高(-1.9 m), 夯实整平之后, 方可铺设砂石垫层, 形成复合地基的褥垫层。垫层材料为中粗砂与 8~20 mm 碎石组成, 应级配合理, 分 2~3 层铺设, 边铺边夯实, 铺设总厚度为 0.3 m。

3.6 现场试验

在工程施工现场, 取由 4 根短桩和 1 根长桩组成的一个单元(即 4S1L 复合桩基)进行承台压重静载荷试验。试验时, 在 4S1L 复合桩基的各个桩顶埋设压力盒, 并在复合桩基和基底之间铺设 0.3 m 厚度的砂石褥垫层, 在褥垫层上部浇注钢筋混凝土承台(承台面积 2 m $\times$ 2 m, 承台厚度 400 mm), 然后安装试验加载装置、量测装置及压重平台反力装置。

本工程静载试验采用慢速维持荷载法, 按《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002)及《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106-2003)等现行规范要求进行。试验最大荷载 3 000 kN, 分 9 级施加, 记录每级荷载下承台的位移随维持荷载时间的变化, 整理得出该复合桩基的荷载-沉降试验曲线如图 4 所示。静载试验测得复合桩基承载力特征值 $Q_a = 320$ kPa; 此时, 复合地基沉降量 $S_a = 6.5$ mm, 这与按长短桩组合多元复合桩基理论公式计算的结果比较接近。因此该场地复合桩基沉降量可控制在 10 mm 以内。

此外, 通过开挖检测、钻探取样、轻便触探等方法对本工程灰砂桩与 CFG 桩组合处理地基效果进行了检测, 检测结果均符合设计要求。

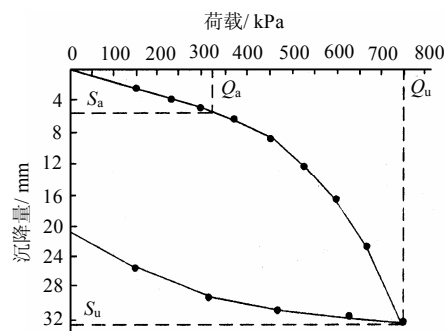


图4 4S1L 复合桩基的荷载-沉降试验曲线
Fig.4 Load-settlement curves of 4S1L composite pile foundation

4 结 论

(1) 对软硬互层地基, 在充分满足安全度(总体安全度大于 2)和沉降控制要求的条件下, 采用长短桩组合的多元复合桩基设计(即复合地基与卸荷减沉桩相组合)方案, 与常规方案(单一桩型, 且等桩长)相比, 更能减小建筑物沉降量, 降低差异沉降, 降低工程造价。

(2) 灰砂桩因桩体中有砂子和水泥的掺入, 可以有效的防止石灰桩心发生软化的问题, 从而确保了桩身强度的增长。将 CFG 桩和灰砂桩组合起来使用, 并按长短桩多元复合桩基进行设计, 可实现地基基础设计方案的优化, 处理效果较好, 具有工程推广应用价值。

(3) 多元复合桩基承载力计算和地基沉降计算公式适用性强, 计算值与实测结果比较接近。

参 考 文 献

- [1] 谢新宇, 杨相如, 施尚伟, 等. 刚柔性长短桩复合地基性状分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 877—882.
- [2] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京: 知识产权出版社. 2004.
- [3] 郑俊杰, 区剑华, 吴世明, 等. 多元复合地基理论与实践[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 208—212.
- [4] 欧丽, 叶梅新, 颜东煌. 长短桩复合地基应力与沉降分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(6): 35—41.
- [5] 王伟, 杨敏, 杨桦. 长短桩桩基础与其它类型基础的比较分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1): 124—129.
- [6] BUDI GOGOT SETYO. Behavior of single piles embedded in elasto-plastic soil under static and dynamic lateral loading[D]. Illinois USA: Illinois Institute of Technology, 2000.
- [7] 陈龙珠, 梁发云, 严平, 等. 带褥垫层刚-柔性桩复合地

- 基工程性状的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(3): 125—129.
- [8] 杨敏, 杨桦, 王伟. 长短桩组合桩基础设计思想及其变形特性分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 103—108.
- [9] ZHANG Ling, ZHAO Ming-hua, HE Wei. Working mechanism of two-direction reinforced composite foundation[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2007, 14(4): 589—594.
- [10] 李文虎, 李仁平, 蒋晓曙. 长短桩非线性多元复合桩基技术及其原位试验研究[J]. 常州工学院学报, 2007, 20(5): 1—4.
- [11] 郑俊杰. 地基处理技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版, 2004.
- [12] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 人民交通出版社, 2003.
- [13] 张玉成. CM 长短桩复合地基的设计及应用[J]. 建筑技术, 2007, 38(3): 170—173.
- [14] 李平, 畅游, 白刚. 砂灰桩地基处理施工[J]. 山西建筑, 2001, 27(1): 68—70.
- [15] 隆威, 邓新德, 蓝冰. 石灰砂桩在治理地下酸性水及地基加固中的应用[J]. 韶关学院学报, 2004, 25(12): 43—46.
- [16] 王振清, 李宏业. 灰砂桩在软弱地基处理中应用[J]. 河北煤炭, 2000(2): 53—54.
- [17] CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Consolidation behavior of cement- and lime/cement-mixed column foundations[J]. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, 2002, 3(5): 507—512.
- [18] 张小平, 俞仲泉. 粉煤灰掺石灰混合料的工程性质试验研究[J]. 河海大学学报, 1999, 27(3): 57—62.
- [19] 王伟, 杨尧志. 灰砂桩复合地基工作性状及抗震性能[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(2): 22—26.