

石灰砂桩非线性组合地基处理技术的应用研究

代国忠, 李文虎, 史贵才

(常州工学院土木建筑工程学院, 常州 213002)

摘要:分析了石灰砂桩作用机理和非线性组合多元复合地基的设计原理, 论述了长短桩非线性组合多元复合地基承载力计算和沉降计算的方法。结合石灰砂桩地基处理工程实例, 介绍了按长短桩非线性组合的复合地基设计计算方法、施工技术和处理效果。实践证明, 长短桩复合地基组合形式多样, 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:石灰砂桩; 长短桩; 复合地基; 承载力; 沉降量

作者简介:代国忠(1963—), 男, 吉林长春人, 教授, 工学博士, 从事岩土工程专业教学与研究等。

1 石灰砂桩作用机理

采用钻机成孔或振动的方法, 将按一定比例配制的生石灰、砂的混合料灌入孔中, 并进行振密或夯实而形成的桩体, 称为石灰砂桩, 它是在常用的石灰桩基础上掺入砂子的一种组合桩型。因桩体中有砂子的掺入, 可以有效地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, 石灰砂桩的桩身强度是影响整个复合地基工作性状的关键。为了提高复合地基承载力, 可将水泥、粉煤灰等掺入石灰桩中, 掺入水泥的石灰砂桩称之为灰砂桩, 掺入粉煤灰的石灰桩也称为二灰桩^[1]。对于灰砂桩, 因有石灰与水泥共同渗入桩间土并和土发生复杂的物理化学反应, 使桩和土之间的相互作用完全不同于柔性砂桩, 该类桩形成的复合地基介于柔性桩与刚性桩之间, 为半刚性桩复合地基。这种复合地基能更有效地发挥其加固效能。

石灰砂桩(或灰砂桩)加固地基的作用形式有桩间土作用、桩身作用和复合地基作用等。

1.1 桩间土作用

(1) 成孔挤密。采用振动法成桩时, 桩孔对地基产生一定的挤密作用。对于渗透性大的砂土地基, 其挤密效果较好, 可考虑 1.2 左右的承载力提高系数; 而灵敏度高的饱和软黏土挤密效果则较差。

(2) 膨胀挤密。桩体中石灰的掺入量较高, 自然状态下生石灰熟化后其体积增大到原来的 1.5~3.5 倍。由于地基土的约束力, 并考虑桩体材料的质量、配合比、密实度等因素影响, 石灰砂桩直径的增大系数为 1.1~1.3 左右^[2]。

(3) 脱水挤密。软黏土含水量约 40%~80%, 1 kg 生石灰消解反应吸收 0.32 kg 水^[3]。反应中放出热量使地基土达到 50°C 以上, 土会气化脱水。此外, 因桩体中掺有渗透性高的中粗砂, 桩身渗透系数比黏性土大 15~200 倍, 有利于软土地基的孔隙水的排出, 可起到较好的排水固结作用^[4]。对于灰砂桩, 还存在水泥的吸水固结作用。

(4) 胶凝作用。生石灰水化物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会与土中二氧化硅和氧化铝反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等水化产物。水化物对土颗粒产生胶结作用, 使土聚集体增大, 一般可增大 3~10 倍以上^[5]。

1.2 桩身作用

因有砂子及水泥的掺入, 保证了石灰砂桩的桩身不产生软化现象。现场测试表明, 对于纯石灰桩, 当石灰填充初始密度为 1.17 t/m³, 上覆压力大于 50 kPa 时, 石灰吸水并不软化, 加之桩顶采用黏土封顶, 可限制石灰膨胀面隆起, 同样可起到提高桩身的密实度的作用。采用掺和料(粉煤灰、火山灰、钢渣右黏性土料、砂子)可有效防止石灰桩软心, 掺入量由现场试验确定。

石灰砂桩桩身材料的 CaO 水化生成物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 显碱性,可以中和地下水的酸性,从而降低地下水的 pH 值,稳定地基土的物理化学性质指标,防止酸性物质对地基土及基础的进一步侵蚀。

1.3 复合地基作用

由于石灰砂桩桩体具有较桩间土更大的强度(抗压强度约为 $600\sim 2\,000\text{ kPa}$),在与桩间土形成复合地基中具有明显的桩体作用。当承受荷载时,桩体将产生应力集中现象。根据国内实测数据,石灰桩复合地基的桩土应力比为 $2.5\sim 5.0$ 。石灰砂桩的桩土应力比为 $3\sim 7$,对于有水泥掺入的灰砂桩,其桩土应力比可提高至 10 以上^[6]。此外,灰砂桩可改善复合地基工作性状,增强抗震性能。

现以石灰砂桩(石灰:砂子体积比 7:3)和灰砂桩(石灰:砂:水泥体积比 6:3:1)对比试验为例,所测得荷载与桩土应力比关系曲线如图 1 所示。

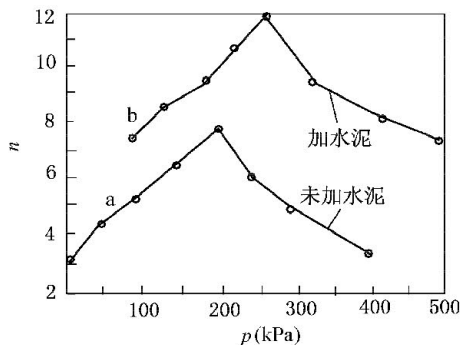


图 1 试桩的荷载与桩土应力比 $p-n$ 关系曲线

2 非线性组合多元复合地基设计原理

对于石灰砂桩、CFG 桩、碎石桩等挤密桩法复合地基,在满足工程要求的前提下,如何减少桩基中的桩数是近年来岩土工程界探索的热门课题^[7~11]。如上海、杭州等地近年来采用控制沉降复合桩基,较充分地利用了地基土承载力,经济效益明显^[12]。

2.1 多元复合地基设计思想

工程实践表明:对软土地基,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,采用长短桩组合的非线性多元复合地基设计(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,更能减少建筑物沉降量,降低差异沉降,降低工程造价。由于采用了多种桩型,且长桩的单桩承载力设计值突破了线性范围,因此该桩基的形式称之为非线性多元复合桩基,可适用于各种软土地基上高层及超高层建筑^[13]。该设计方法拓展了各类挤密桩法地基处理的适用范围,具有工程应用推广价值。

长桩长度 $L \geq 8\text{ m}$,主要起到减沉和控制地基变形的作用^[14]。长桩桩型采用刚性桩、半刚性桩或柔性桩均可,如预应力管桩、钢筋混凝土灌注桩、石灰砂桩、二灰桩、CFG 桩、碎石桩、水泥土搅拌桩及夯实水泥土桩等。

短桩长度 $L = 3\sim 10\text{ m}$,多柔性桩或半刚性桩,以加固地基发挥承载作用为主。可选择石灰桩、石灰砂桩、灰砂桩、灰土桩、CFG 桩、水泥土搅拌桩(或粉喷桩)、砂桩、碎石桩、夯实水泥土桩等。

短桩和天然地基组成复合地基,在复合地基和基底之间,铺设砂石褥垫层($20\sim 30\text{ cm}$),用以调节桩与土之间的荷载分配。长、短桩根据土层条件,可按摩擦桩端承摩擦桩设计。

2.2 多元复合地基承载力计算

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

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

式中, f_{spk} 为多元复合地基承载力特征值(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,或由桩的类型取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。

若长桩与短桩桩型相同,且等间距对称布置,可按单元复合地基进行计算。假定长、短桩承载力相等,对式(1)计算进行简化,简化之后见式(9)。

2.3 多元复合地基沉降计算

长短桩组成的多元复合地基总沉降量计算可采用分层的形式计算^[15]。总沉降量 s 由三部分组成

成:短桩加固区内土层沉降量 s_1 ,短桩端部到长桩端部加固区(长桩控制变形区)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土的分层数; 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} 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。

3 工程应用举例

采用石灰砂桩(或灰砂桩)处理地基是一项新技术,该技术既可用于处理建筑基础地基,也可用于处理道路的路基,其工程应用效果比较好^[16~19]。以长春市某商住楼建筑工程为例,介绍石灰砂桩长短桩非线性组合地基处理方案设计 & 处理效果。

3.1 工程概况

吉林省长春市某商住楼地面以上 10 层,建筑占地面积为(30×80)m²,总建筑面积为 22 000 m²,基础采用筏板基础,筏板厚度 0.8 m,筏板底面埋深 1.5 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 0~1.5 m,为建筑垃圾;
- (2) 粉质黏土:厚 2~6 m,可塑~硬塑状态, $a_{1-2}=0.25 \text{ MPa}^{-1}$, $f_{sk}=150 \text{ kPa}$, $E_s=6.5 \text{ MPa}$;
- (3) 黏土:厚 3~8 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 6~14 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 0.8~2.5 m。该建筑场地原为一电解铝厂车间,地下水酸度较高,pH 值为 3.0~5.2。

3.3 地基处理设计方案选择

因与筏板基础接触的地基为粉质黏土,其天然地基承载力不足,需对该持力层进行加固处理。综合评价,该工程采用长短桩非线性组合的地基处理设计方案为最佳。

考虑到建筑场地曾受到酸性电解液长期腐蚀影响,选择地基处理方案时,应兼顾对酸性地下水的治理。因生石灰吸水作用及可中和地下水的酸性,为此,决定采用石灰砂桩处理该地基,按长短桩组成的复合地基形式进行设计,其复合地基承载力设计值为 $f_{spk}=300 \text{ kPa}$ 。设计孔径 $\phi 350 \text{ mm}$,长、短桩间距均为 1.0 m,正方形对称布置,短桩长 6 m,长桩长 14 m。短桩用于提高地基承载力,长桩用于控制沉降。在复合地基和基底之间,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。

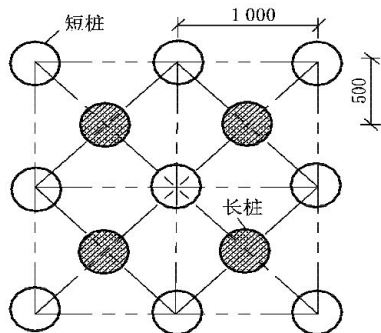


图 2 石灰砂桩的桩位平面布置

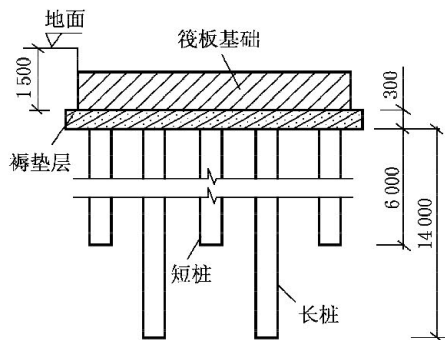


图3 石灰砂桩的桩位剖面布置

3.4 复合地基设计计算

因本工程地基处理设计方案长、短桩的桩型相同,且等间距布置,可按单元复合地基进行计算。

(1) 单桩承载力特征值确定。现场静载试验测得短桩的单桩承载力特征值为 82 kN;或取下列二式计算结果较小者。

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

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

(2) 复合地基承载力特征值计算。

$$f_{spk} = m f_{pk} + \beta(1-m) f_{sk} \quad (9)$$

$$f_{pk} = R_a / A_p \quad (10)$$

以上各式符号含义见《建筑地基处理技术规范》JGJ79—2002。结合本工程各参数取值为

$$u = \pi d = 3.14 \times 0.35 = 1.099 \text{ m}$$

$$q_{si} = 1.1 \times 26 = 28.6 \text{ kPa};$$

$$l_i = 6 \text{ m}; \alpha = 0.6; q_p = 200 \text{ kPa};$$

$$A_p = 1.1\pi d^2 / 4 = 0.1058 \text{ m}^2;$$

$$\eta = 0.50; f_{cu} = 1600 \text{ kPa}; \beta = 0.90;$$

$$m = 2 \times (1.15 \times d)^2 / (1.13 \times l_a)^2 \\ = 2 \times (1.15 \times 0.35)^2 / (1.13 \times 1.0)^2 \\ = 0.25;$$

$$f_{sk} = 1.1 \times 150 = 165 \text{ kPa};$$

$$E_{spi} = [1 + m(n-1)] E_{si};$$

$$n = f_{pk} / f_{sk}。$$

代入以上各参数,经计算得

$$R_a = 85 \text{ kN}, \text{ 实取 } R_a = 82 \text{ kN}, \text{ 则 } f_{pk} = 775 \text{ kPa}。$$

$$f_{spk} = 305 \text{ kPa} > 300 \text{ kPa}, \text{ 满足设计要求}。$$

静载试验测出长桩单桩承载力特征值 105 kN。当长桩达到承载力极限状态时,整个地基沉降量为 25 mm 左右,与计算结果比较接近。当长桩所受压应力达到其特征值的 80%~90% 时,地基沉降量为 10~15 mm,这与该工程实际荷载情况相当。因此该场地的复合地基沉降量可控制在 15 mm 以内。

3.5 施工技术

(1) 桩体选材

构成桩体的材料是生石灰和中粗砂,灰块粒径以 ≤ 5 cm 左右为宜,生石灰活性氧化钙含量 $> 80\%$,生石灰中不得含有欠火灰,粉状灰 $\leq 20\%$ 。

中粗砂要求过筛除去其中的卵石、碎石、泥块等,含泥量 $\leq 6\%$ 。

(2) 配合比选择

施工前进行试桩和材料配合比试验。考虑到砂的掺入量越高,桩身强度越高,但桩身侧胀作用和膨胀量变小,中和地下水能力减弱。经室内模拟对比试验,确定石灰和砂的配合比 1:1.2 时为最佳,pH 值为 12.0,桩身强度高。

(3) 制桩工艺

本工程采用长螺旋回转钻机在土中成孔,成桩时分段夯实,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。

施工顺序按“先外排后内排,先周边后中间”的原则,隔孔跳打。

控制投料量不少于桩孔体积的 1.5 倍(即充盈系数 ≥ 1.5),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。

(4) 垫层铺设

待石灰砂桩全部施工完毕,质量检查合格之后,方可铺设砂石垫层,形成复合地基的褥垫层。垫层材料应级配合理,分 2~3 层铺设,边铺边夯实,铺设总厚度为 0.3 m。

3.6 处理效果

采用开挖检测、采水试样、轻便触探和静载试验探检测等方法对本工程石灰砂桩处理地基效果进行了检测。施工 22 d 后,对处理的场地采水试样分析,pH 值为 10.5,呈碱性。开挖检测发现桩径多为 400~450 mm,桩体胶结良好,锹镐挖掘困难,观测地表无隆起异常现象,桩顶 1 m 以下进行轻便触探检测, N_{10} 击数为 25~40,多数大于 32

击;静载测试复合地基承载力特征值达到了320 kPa。这说明该工程施工质量良好,符合设计要求。

4 结 论

(1) 石灰砂桩因桩体中有砂子的掺入,可以有效地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。为提高桩体强度,可将水泥(或粉煤灰)掺入石灰砂桩中,即做成由石灰、水泥、砂子组成的灰砂桩。

(2) 石灰砂桩(或灰砂桩)复合地基整体刚性强,加固层中桩土协调变形能力强。该类桩是治理酸性地下水及加固地基土形成复合地基一种比较有效的方法;成桩后可改变砂性土的结构,增强地基抗震能力。

(3) 长短桩组合的非线性多元复合地基设计方案安全可靠,具有较大的灵活性,桩型选择广泛,可实现单元组合或多元组合。采用该地基处理设计方案可有效提高地基承载力,减小建筑物沉降量,降低差异沉降,降低工程成本。

参 考 文 献

[1] 李兆平,张弥. 二灰桩在软土路基加固中的应用[J]. 北方交通大学学报,1999,23(4):78~80.
 [2] 郑俊杰. 地基处理技术[M]. 武汉:华中科技大学出版,2004.
 [3] 陈友富,许建峰. 用生灰砂桩挤密法处理高含水黄土地基研究与实践[J]. 防渗技术,2002,8(4):5~7.
 [4] 郑俊杰,刘志刚,吴世明. 石灰桩复合地基固结分析[J]. 华中理工大学学报,2000,28(5):111~113.

[5] 叶书麟,韩杰,叶观宝. 地基处理与托换技术[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
 [6] 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.
 [7] 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.
 [8] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京:知识产权出版社,2004.
 [9] 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.
 [10] 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.
 [11] 王伟,杨敏,杨桦. 长短桩桩基础与其他类型基础的比较分析[J]. 建筑结构学报,2006,27(1):124~129.
 [12] 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.
 [13] 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.
 [14] 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.
 [15] 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.
 [16] 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.
 [17] 隆威,邓新德,蓝冰. 石灰砂桩在治理地下水酸性水及地基加固中的应用[J]. 韶关学院学报,2004,25(12):43~46.
 [18] 王振清,李宏业. 灰砂桩在软弱地基处理中的应用[J]. 河北煤炭,2000(2):53~54.
 [19] 张小平,俞仲泉. 粉煤灰掺石灰混合料工程性质试验研究[J]. 河海大学学报,1999,27(3):57~6