

长短桩复合地基设计计算

马 骥 张东刚 张 震 阎明礼
(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

【摘 要】 阐述了长短桩复合地基的设计思想,介绍了长短桩复合地基承载力和变形的计算方法,并对设计中有关设计参数的确定进行了分析。

【关键词】 承载力; 变形; 长短桩复合地基

【中图分类号】 TU472

Design of the Composite Foundation with long-short-pile

【Abstract】 The design idea of long-short-pile composite foundation is expounded. The calculating methods of bearing capacity and settlement are introduced. The determination of related parameters is also analyzed.

【Key words】 bearing capacity; settlement; long-short-pile composite foundation

0 引言

随着理论研究的深入、工程经验的积累和施工技术的发展,以 CFG 桩复合地基为代表的刚性桩复合地基应用越来越广,大量工程实践表明,复合地基在工程中应用成功与否,设计起着核心作用。根据场地地质情况和设计要求选择合理的地基处理方案尤为重要。通常在刚性桩复合地基设计中,桩长基本为一定值,即桩端落在同一持力层上。在一定条件下,也可采用长桩与短桩相结合的方法对地基进行综合处理,分别发挥其各自特点,在确保地基处理效果的前提下,达到方案合理、节约投资、缩短工期的目的。本文就长短桩复合地基的设计思想和与设计方法作一介绍,供工程设计人员参考。

1 设计思想

在长短桩复合地基当中,长桩与短桩间作,通过长桩不仅能够提高承载力,而且可将荷载通过桩身向地基深处传递,减少压缩层变形,因此桩体强度要求较高,多采用刚性桩(如 CFG 桩),设置短桩的目的主要有以下两方

面:

1) 当基底以下存在厚度不大的(局部)软弱土层时,采用短桩对该区域土层进行加固,可提高基底软弱土层的承载力,消除局部软弱土引起的不均匀沉降,短桩的加固深度、加固范围可通过分析勘察报告、基坑开挖验槽、轻便触探 N_{10} 等手段确定,在这种情况下短桩可采用夯实水泥土桩、旋喷桩等形式与长桩间作形成多桩型复合地基,亦可称为短桩补强组合复合地基;

2) 对于刚性桩复合地基,设计时要求桩端落在强度较高、压缩性较小的土层上。根据勘察报告,当基底以下存在上下两层较为理想的桩端持力层时,如采用短桩方案,将桩端放在上层持力层,即使复合地基承载力能够满足设计要求,由于加固区较浅,沉降计算结果偏大;如采用长桩方案,将桩端放在下层持力层,复合地基承载力、变形计算均能够满足设计要求,但地基处理工作量加大,费用较高。因此可采用长短桩组合的刚性桩复合地基,长、短桩分别落在下、上两层桩端持力层上,充分发

挥上下两层桩端持力层的特性,利用短桩提高复合地基的承载力,通过长桩减少变形,在满足设计要求的同时减少地基处理的工作量。

对地基基础设计等级为一级、二级和部分三级的建筑物,均应按地基变形进行设计^①,据悉新修订的地基处理规范对于刚性桩复合地基也明确提出必须进行变形验算,可见变形是复合地基设计的主要控制因素之一。本文以CFG桩复合地基为代表,针对上述第二种情况对长短桩复合地基的设计方法进行分析。

2 复合地基设计和参数确定

长短桩复合地基设计理论目前仍处于研究阶段,根据刚性桩复合地基设计的理论和实践^{2]},本文建议长短桩复合地基的承载力和变形计算可分别参照同一桩长复合地基承载力、变形计算方法,第一步计算短桩复合地基承载力,然后视短桩复合地基为长短桩复合地基的“桩间土”,计算长短桩复合地基的承载力,再进行变形计算。具体介绍如下:

2.1 复合地基承载力计算

短桩复合地基承载力可用下面的公式进行估算:

$$f_{sp,kl} = \frac{1}{A_1} [\alpha\beta f_k (A_1 - A_{pl}) + R_{kl}] \quad (1)$$

式中: $f_{sp,kl}$ ——短桩复合地基承载力标准值, kPa;

f_k ——天然地基承载力标准值, kPa;

A_1 ——每根短桩分担的面积, m^2 , 长短桩正方形等间距布桩时为 $2b^2$, b 为桩间距(见图1);

A_{pl} ——短桩单桩截面面积, m^2 ;

α ——桩间土强度提高系数;

β ——桩间土强度发挥度,对一般工程 $\beta = 0.9 \sim 1.0$,对重要工程或对变形要求高的建筑物 $\beta = 0.75 \sim 1.0$;

R_{kl} ——短桩单桩承载力标准值, kN。

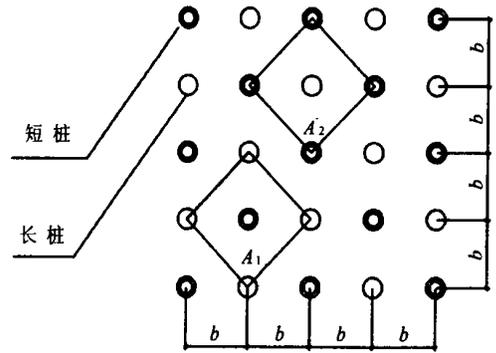


图1 长短桩正方形等间距布置平面示意图

长短桩复合地基承载力可用下面的公式进行估算:

$$f_{sp,k2} = \frac{1}{A_2} [\alpha\beta f_{sp,kl} (A_2 - A_{p2}) + R_{k2}] \quad (2)$$

式中: $f_{sp,k2}$ ——长短桩复合地基承载力标准值, kPa;

$f_{sp,kl}$ ——短桩复合地基承载力标准值, kPa;

A_2 ——每根长桩分担的面积, m^2 , 长短桩正方形等间距布桩时, $A_2 = A_1$;

A_{p2} ——长桩单桩截面面积, m^2 ;

R_{k2} ——长桩单桩承载力标准值, kN。

短桩、长桩单桩承载力标准值 R_k 可按下列式计算:

$$R_k = \left[U_p \sum q_{si} h_i + q_p A_p \right] / k \quad (3)$$

式中: U_p ——桩的周长, m;

q_{si} ——第 i 层土与土性和施工工艺有关的极限侧阻力, kPa, 按建筑桩基技术规范有关规定取值;

h_i ——第 i 层土厚度, m;

q_p ——与土性和施工工艺有关的极限端阻力, kPa, 按建筑桩基技术规范有关规定取值;

① 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范(征求意见稿). 2000

k ——安全系数,取2.0。

当用单桩静载试验求得单桩极限承载力 R_u 后, R_k 可按下式计算:

$$R_k = \frac{R_u}{k} \quad (4)$$

当考虑基础宽度和深度对地基承载力标准值进行修正时,一般宽度不作修正,其基础宽度地基承载力修正系数取零,深度可作修正,其基础埋深地基承载力修正系数取1.0。在深宽修正后复合地基承载力标准值 $f_{c,a}$ 为:

$$f_{c,a} = f_{sp,k2} + \gamma_m(d - 1.5) \quad (5)$$

式中: γ_m ——基础底面以上土的加权平均重度, kN/m^3 地下水以下取浮重度;
 d ——基础埋置深度,m,一般自室外地面标高算起。

复合地基承载力计算时需满足建筑物荷载要求,当在轴心荷载作用时

$$p_k \leq f_{c,a} \quad (6)$$

式中: p_k ——相应于荷载效应标准组合基础底面处的平均压力值。

当在偏心荷载作用下,除满足上式外,尚应满足下式要求

$$p_{k \max} \leq 1.2f_{c,a} \quad (7)$$

式中: $p_{k \max}$ ——相应于荷载效应标准组合基础底面边缘的最大压力值。

2.2 复合地基变形计算

长短桩复合地基变形计算采用复合模量法,计算时采用的复合土层分层除与天然地基相同外,短桩桩端位置、长桩桩端位置也作为复合土层的分层边界,从而将加固区分为1、2两部分(见图2)。加固区1内复合土层的模量等于天然地基模量的 ξ_1 倍,加固区2内复合土层的模量等于天然地基模量的 ξ_2 倍,复合土层和下卧层土体内的应力分布采用各向同性均质的直线变形理论,复合地基最终变形量可按下式计算

$$s_c = \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{\zeta_1 E_{si}} \left(Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1} \right) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p_0}{\zeta_2 E_{si}} \left(Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1} \right) + \sum_{i=n_2+1}^{n_3} \frac{p_0}{E_{si}} \left(Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1} \right) \right] \quad (8)$$

式中: n_1 ——加固区1范围土层分层数;

n_2 ——加固区1、2范围土层分层数;

n_3 ——沉降计算深度范围内土层总的分层数;

p_0 ——对应于荷载标准值时的基础底面处的附加压力,kPa;

E_{si} ——基础底面下的第*i*层土的压缩模量,MPa;

z_i, z_{i-1} ——基础底面至第*i*层土、第*i-1*层土底面的距离,m;

$\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_{i-1}$ ——基础底面计算点至第*i*层土、第*i-1*层土底面范围内平均附加应力系数;

ζ_1 ——加固区1土的模量提高系数,

$$\zeta_1 = \frac{f_{sp,k1}}{f_k} \times \frac{f_{sp,k2}}{f_{sp,k1}} = \frac{f_{sp,k2}}{f_k};$$

ζ_2 ——加固区2土的模量提高系数,

$$\zeta_2 = \frac{f_{sp,k2}}{f_{sp,k1}};$$

ψ ——沉降计算修正系数,根据地区沉降观测资料及经验确定,也可采用表1的数值。

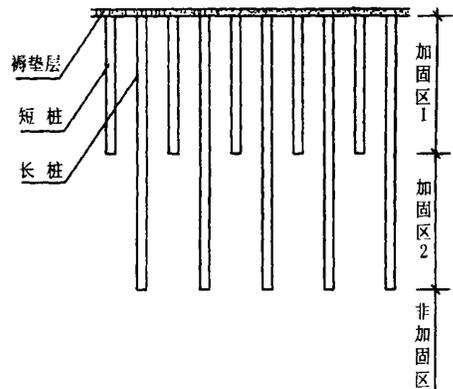


图2 长短桩复合地基剖面示意图

表1 变形计算经验系数 ψ 值表

| | | | | | |
|------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| \bar{E}_s/MPa | 2.5 | 4.0 | 7.0 | 15.0 | 20.0 |
| ψ | 1.1 | 1.0 | 0.7 | 0.4 | 0.2 |

注: \bar{E}_s 为变形计算深度范围内压缩模量的当量值, 应按下式计算:

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{s_i}}}$$

式中: A_i ——第 i 层土附加应力沿土层厚度积分值;

E_{s_i} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量值, MPa, 桩长范围内的复合土层按复合土层的压缩模量取值

地基变形计算深度必须大于复合土层的厚度, 并应满足现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89) 中地基变形计算深度的有关规定。

2.3 复合地基设计

长短桩复合地基设计以复合地基承载力和变形计算为主要依据, 并考虑以下诸因素进行综合分析, 合理设计:

1) 施工设备和施工工艺

复合地基设计时需考虑采用何种设备和工艺进行施工, 选用的设备穿透土层能力和最大施工桩长能否满足要求, 施工时对桩间土产生的影响是否会造成相邻桩出现质量问题, 选用的设备当地是否具有。施工设备和工艺的选择是复合地基设计的一个重要环节。

2) 场地周围环境

场地周围环境情况是设计时确定施工工艺的一个重要因素。当场地离居民区较近, 或场地周围有精密设备仪器的车间和试验室以及对振动比较敏感的管线, 施工不宜选择振动沉管工艺, 宜选择无振动低噪声的长螺旋钻施工工艺; 若场地位于空旷地区, 且地基土主要为松散的粉细砂或填土, 施工宜选择振动沉管工艺。

3) 建筑物结构布置及荷载传递

目前, 高层建筑的地基处理工程越来越多, 建筑物结构布置及荷载传递是复合地基设计必须考虑的问题。如建筑物是单体还是群

体建筑; 体型是简单还是复杂; 结构布置是均匀还是存在偏心荷载; 主体建筑物周围是否存在地下车库之类的大开间结构, 建筑物是否存在转换层或地下大空间; 建筑物通过墙、柱和核心筒传到基础的荷载扩散到基底的范围及均匀性等。总之, 在设计时必须认真分析结构特点, 弄清结构传递荷载的途径以及建筑物对变形的适应能力, 做到合理布桩, 方可保证地基处理达到预期目的。

长短桩复合地基设计主要确定 5 个设计参数: 桩长、桩径、桩间距、桩体强度、褥垫层厚度及材料。

1) 桩长 L

长短桩复合地基要求桩端均应落在好的持力土层上, 它是复合地基设计的一个重要原则。因此, 桩长是长短桩复合地基设计首要确定的参数, 它取决于建筑物对承载力和变形的要求、土质条件和设备能力等因素。设计时根据勘察报告, 分析各土层, 确定桩端持力土层和桩长, 并按式(3) 计算单桩承载力。

2) 桩径 D

CFG 桩桩径的确定取决于所采用的成桩设备, 一般设计桩径为 350 ~ 600 mm, 长、短桩的桩径可不相同。

3) 桩间距

长短桩之间的桩间距 b 一般取 3 ~ 5D, 桩间距的大小取决于设计要求的复合地基承载力和变形、土性与施工机具。一般设计要求的承载力大时 b 取小值, 但必须考虑施工时相邻桩之间的影响, 就施工而言希望采用大桩距大桩长, 因此 b 的大小应综合考虑。

设计时可先设定长短桩的桩间距, 通过反复试算承载力和变形综合确定。一般情况下, 长、短桩宜采用等间距布置。

4) 桩体强度

原则上, 桩体配比按桩体强度控制, 最低强度等级按 3 倍的桩顶应力 σ_p 确定, 即 $f_{\text{cuk}} \geq 3\sigma_p$ 。 f_{cuk} 为桩身试块标准养护 28 d 无侧限抗

压强度标准值。

桩顶应力按下式计算:

$$\sigma_p = \frac{R_k}{A_p} \quad (9)$$

5) 褥垫层厚度及材料

褥垫层厚度一般取 10~30 cm 为宜,当桩间距过大时,褥垫厚度可适当加大。褥垫层材料可用粗中砂、碎石、级配砂石(限制最大粒径)。

3 工程实例

某工程^[2]位于北京市朝阳区望京,该建筑地上 22 层,地下 2 层,结构型式为剪力墙结构,箱型基础。基础埋深-6.52 m,±0.00=39.87 m,设计要求地基承载力标准值 370 kPa,基础最终沉降量小于 50 mm,倾斜不大于 0.002。根据勘察报告,基底以下土质情况自上而下为:

①杂填土: 杂色,局部以素填土为主,无规律性,夹大量碎砖、石、灰渣,松散不均匀,厚度

约 4~7 m;

②粉质粘土、粉土: 褐色~灰褐色,含云母,可塑,中等压缩性,最大厚度 1.7 m;

③中、细砂: 褐黄色,砂质均匀,中密~密实,厚度 1.5~2 m;

④粉土: 灰褐~褐色,夹粉质粘土,含云母、铁、锰氧化物,饱和,中密~密实,中等压缩性,厚度 2.4~2.8 m;

⑤粘土、粉土互层: 褐色,饱和,粘土为可塑~硬塑,粉土中密~密实,厚度 6 m 左右;

⑥中、细砂: 褐黄色,以中砂为主,含砾石,密实,厚度 1.5~2 m;

⑦粘土、粉土: 褐黄色~褐色,可塑~硬塑,中等压缩性,埋深超过 24 m,厚度 5 m 左右;

⑧砾砂: 褐黄~黄褐色,饱和,埋深超过 30 m。

基底以下各层土的物理力学性质指标见表 2。

表 2 土的物理力学性质统计(平均值)表

| 土层及编号 | 土的物理力学指标 | | | | | | | 地基承载力标准值 f_k/kPa |
|----------|---------------|------------------------------------|------------|---------------|--------------------|---------|---------|-----------------------|
| | 含水量 $w/\%$ | 天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$ | 孔隙比 e | 液性指数 I_L | 压缩模量 $E_s/M Pa$ | | | |
| | | | | | 100~200 | 200~300 | 300~400 | |
| ①杂填土 | 22.1 | 19.1 | 0.68 | 0.31 | | | | |
| ②粉质粘土、粉土 | 25.9 | 19.8 | 0.73 | 0.72 | 8.0 | 10.0 | 12.0 | 170 |
| ③中、细砂 | | | | | 20 | 22 | 24 | 220 |
| ④粉土 | 21.4 | 20.6 | 0.60 | 0.22 | 10.0 | 12.0 | 14.0 | 190 |
| ⑤粘土粉土互层 | 26.9 | 19.3 | 0.80 | 0.23 | 9.0 | 11.0 | 13.0 | 180 |
| ⑥中、细砂 | | | | | 25 | 27 | 30 | 280 |
| ⑦粘土、粉土 | 21.8 | 20.8 | 0.58 | 0.23 | 9.0 | 11.0 | 13.0 | 180 |
| ⑧砾砂 | | | | | 30 | 33 | 36 | 340 |

考虑场地地质条件、周围环境、施工工艺,经过方案论证,本工程采用长短桩相结合的 CFG 桩复合地基方案:短桩采用振动沉管工艺施工,有效桩长 6.2~7.2 m,以中、细砂③层为桩端持力层,桩体强度 C15,桩径 400 mm,桩数 449 根;长桩采用长螺旋钻孔管内泵

压工艺施工,有效桩长 18.0~18.5 m,以中、细砂⑥层为桩端持力层,桩体强度 C20,桩径 400 mm,桩数 390 根。

承载力验算:

根据载荷试验结果,桩间土承载力标准值在地基处理完成后为 108 kPa,短桩单桩承载

力标准值为 190 kN, 长桩单桩承载力标准值为 650 kN, 即:

取 $\alpha=1.0$, $\beta=0.9$, $f_k=108$ kPa, $R_{k1}=190$ kN, $R_{k2}=650$ kN, 由式(1)可得短桩复合地基承载力标准值 $f_{sp,k1}$ 为 182.7 kPa, 由式(2)可得长短桩复合地基承载力标准值 $f_{sp,k2}$ 为 427.8 kPa, 在不作深度修正的情况下即可满足设计要求。

变形验算:

按照式(8)计算得到长短桩复合地基平均沉降量为 40 mm, 变形满足设计要求。

该楼主体结构封顶时沉降量为 13.4 ~ 20.0 mm, 现已投入使用。北京地区一般结构封顶时的沉降量占最终总沉降量的 50% ~ 70%, 据此推算该楼最终沉降量为 30 ~ 40 mm, 与计算结果较为吻合。

4 结 语

随着技术进步和对地基处理要求的提高, 地基处理手段势必从单一方法向同时运用多种处理方法发展。复合地基设计不仅是根据承载力和变形确定设计参数, 而且在设计时必须综合考虑建筑物对变形的适应能力、地基特点及施工等诸多因素。根据土质情况采用长短桩相结合的复合地基方案并选择合理的施工工艺是一种有效的地基处理方法, 值得进一步研究和推广。

参 考 文 献

- 1 阎明礼. 地基处理技术. 北京: 中国环境出版社, 1996. 243 ~ 248
- 2 赵京文, 化建新. 北京纺机厂高层住宅地基处理方案对比分析. 岩土工程技术, 1999(2). 12 ~ 16

收稿日期: 2000-12-13

(上接第 72 页)

3) 本文将抗拔土体的上部土体视为“倒台体”, 并假设滑裂面纵断面线为与水平面成 α 角的直线。实践证明: 在这一假设条件下, 计算过程大大简化, 并由此推求出了地表破坏半径 R' 与摩擦角 φ 的关系式, 由式(9)、(7)可知, 当 φ 为 $30^\circ \sim 35^\circ$ 时, R' 为 $(0.94 \sim 1.13)B$, 平均值为 $1.04B$, 而文献[3]则统一取为 $1.2B$ (没考虑 φ 值影响)。其差别主要来源于对上部滑动土体纵断面线的拟定不同, 本文设定为直线, 由此所确定的破坏土体为“倒台体”; 而文献[3]则取为抛物线, 由此所确定的破坏土体为“喇叭状体”。

参 考 文 献

- 1 SDGJ62-84 送电线路基础设计规定. 北京: 水利电力出版社. 1986
- 2 李正民. 土体抗拔性能试验研究及其理论分析. 高压输电线路学术讨论会论文集. 1981
- 3 刘文白等. 风积砂地基扩展基础上拔机理及计算模式. 工程勘察, 2000, (4): 3 ~ 6

收稿日期: 2000-12-25