

高层建筑长短桩复合地基计算方法探讨

翟晓力¹, 葛忻声²

(1.山西水利职业技术学院, 山西 太原 030027; 2.太原理工大学, 山西 太原 030024)

摘要:介绍了长短桩复合地基承载力和沉降变形的设计计算方法,并通过长短桩复合地基的工程实例将计算结果与实测结果进行对比分析,结果表明不同的计算方法有各自的适用范围,应根据工程的实际情况选择适当的计算方法,可为该类长短桩复合地基承载力和沉降变形计算提供参考。

关键词:长短桩复合地基;高层建筑;承载力;沉降

中图分类号: TU470⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)01—0100—05

Research on Calculation Methods for Long-short-pile Composite Foundation of High-rise Building

ZHAI Xiao-li¹, GE Xin-sheng²

(1. Shanxi Vocational and Technical College of Water Conservancy, Taiyuan, Shanxi 030027, China;

2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: The calculation methods for the bearing capacity and settlement deformation of long-short-pile composite foundation are introduced here, and the calculated values are compared with actual measured values through engineering examples. The results show that different calculation methods would have respective suitable scope, the appropriate calculation method should be selected according to practical situation, meanwhile, the results could provide references to the calculation for the bearing capacity and settlement deformation of similar long-short-pile composite foundations.

Keywords: long-short-pile composite foundation; high-rise building; bearing capacity; settlement

0 引言

近几年,随着复合地基理论和技术的发展,许多新型的复合地基被应用到工程的设计和实践中去,长短桩复合地基就是其中的一种。长短桩复合地基既可以提高承载力,又可以减少沉降。由于长短桩复合地基的作用机理还不成熟,但已有不少学者对此进行了探讨,并将之应用于实践,提出了此类复合地基承载力和沉降的设计计算理论。

1 承载力计算

在长短桩复合地基进行设计时,一般的设计思想是承载力和变形计算分别根据长桩和短桩复合地基承载力的公式计算承载力,然后视短桩复合地基为长桩复合地基的桩间土来计算长短桩复合地基的承载力,再进行变形计算。

承载力设计计算方法有两种:

(1) 龚晓南课题组提出承载力计算公式:

复合地基承载力计算公式^[1]:

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

式中: m_1 、 m_2 分别为长桩、短桩的置换率; R_{a1} 、 R_{a2} 分别为长桩、短桩单桩竖向承载力特征值; A_{p1} 、 A_{p2} 分别为长桩、短桩横截面面积; f_{spk} 、 f_{sk} 分别为复合地基、桩间土的承载力特征值; β_1 、 β_2 分别为短桩、桩间土强度发挥系数。

长桩、短桩单桩承载力标准值,可由载荷试验确定或由下二式计算的小值确定:

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (2)$$

$$R_a = u_p \sum_i q_{si} l_i + \zeta A_p q_p \quad (3)$$

式中: f_{cu} 为与搅拌桩水泥土配方相同的立方体试块(边长为 70.7 mm 或 50 mm)在标准养护条件下 28 d 龄期立方体抗压强度平均值; l_i 、 u_p 分别为桩在不同土层中的长度、桩周长; q_{si} 、 q_p 分别为不同土层桩周土的摩阻力特征值、桩端土地基承载力特征值; η 、 ζ 为折减系数。无资料时可参照现行地基处理规范中搅拌桩的相关内容选取。应用公式(1),可以通过调整长桩桩数(反映为 m_1 值)、短桩桩数(反映为 m_2 值)来进行优化设计。

(2) 马骥等提出的承载力计算公式:

短桩复合地基承载力公式^[2]:

$$f_{sp, k1} = \frac{1}{A_1}[\alpha\beta f_k(A_1 - A_{p1}) + R_{k1}] \quad (4)$$

式中: $f_{sp, k1}$ 为短桩复合地基承载力标准值(kPa); A_1 为每根桩分担的面积(m^2);正方形等间距布桩时为 $2b^2$ (b 为桩间距); f_k 为天然地基承载力标准值(kPa); A_{p1} 为短桩单桩截面面积; α 为桩间土强度提高系数; β 为桩间土强度发挥度,对一般工程 $\beta = 0.9 \sim 1.0$,对重要工程或变形大的建筑物, $\beta = 0.75 \sim 1.0$; R_{k1} 为短桩单桩承载力标准值(kN)。

长短桩复合地基承载力计算公式:

$$f_{sp, k2} = \frac{1}{A_2}[\alpha\beta f_{sp, k1}(A_2 - A_{p2}) + R_{k2}] \quad (5)$$

式中: $f_{sp, k2}$ 为长短桩复合地基承载力标准值(kPa); $f_{sp, k1}$ 为短桩复合地基承载力标准值(kPa); A_2 为每根桩分担的面积(m^2);正方形等间距布桩时, A_{p2} 为长桩单桩截面面积(m^2); R_{k2} 为长桩承载力标准值(kN)。

2 沉降计算

目前复合地基的沉降计算理论还不成熟,但根据工程实践和当前的理论研究提出了一些实用的沉降计算方法,主要有实体深基础法和分层总和法两种。

长短桩复合地基沉降计算则是利用实体深基础法按桩长将基础分为三部分二个加固区,并把加固区增强体与基体视作一复合土体计算其复合模量,最后按分层总和法计算整个复合地基的沉降。

沉降计算方法有两种:

(1) 龚晓南课题组的复合地基沉降计算公式:

沉降计算选取图 1 所示剖面图。沿竖直方向的计算沉降区域分为三部分:长短桩复合区域、长桩区域、下卧层区域。

沉降计算中的每个区域均采用《建筑地基基础

设计规范》^[3](GB50007 - 2002) 中的方法,计算公式为:

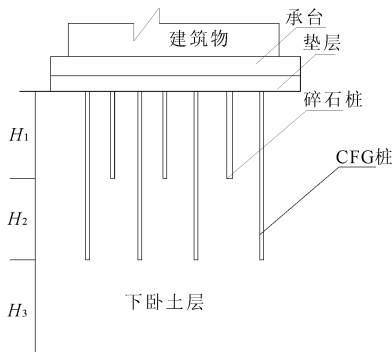


图 1 长短桩复合地基剖面示意图

$$S_C = \psi(S_{H_1} + S_{H_2} + S_{H_3}) = \psi\left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{P_0}{E_{spi}}(Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{P_0}{E_{spi}}(Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_2+1}^{n_3} \frac{P_0}{E_{spi}}(Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})\right] \quad (6)$$

式中: S_C 为计算沉降量; S_{H_1} 为 H_1 区域的计算沉降量; S_{H_2} 为 H_2 区域的计算沉降量; ψ 为沉降计算修正系数; P_0 为基础底面处的附加压力; E_{spi} 为天然土层与桩形成的复合模量,砂垫层的模量按书中取; Z_i 、 Z_{i-1} 为基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离; $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ 为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; n_1 、 n_2 为区域 H_1 、区域 H_2 内土层数。

H_1 区域、 H_2 区域内的复合模量公式如下:

$$E_{sp1} = m_1 E_{p1} + m_2 E_{p2} + (1 - m_1 - m_2) E_s \quad (7)$$

$$E_{sp2} = m_1 E_{p1} + (1 - m_1) E_s \quad (8)$$

式中: E_{sp1} 、 E_{sp2} 分别为 H_1 区域、 H_2 区域复合模量; E_{p1} 、 E_{p2} 、 E_s 分别为长桩、短桩、天然土的压缩模量,其中柔性桩的取值是结合本工程的设计、施工情况并参照《复合地基》^[4] 而定的; m_1 、 m_2 分别为长桩、短桩的置换率。

刚柔性长短桩复合地基以允许沉降量为控制指标,考虑刚性桩、柔性桩与土的共同作用来确定刚性桩的布桩量,而复合地基承载力强度是否满足,则通过复合地基承载力验算来核定或调整。

由于刚柔性长短桩复合地基中设置了褥垫层,以此来协调桩土共同变形,发挥桩间土的承载力,但上述公式中并未考虑土体的承载力,以及在计算沉降时没有把下卧层土体沉降考虑在内。

(2) 阎明礼^[5] 等的复合地基沉降计算公式:

沉降计算选取图 2 所示剖面图,沿竖直方向的计算沉降区域分为两部分。

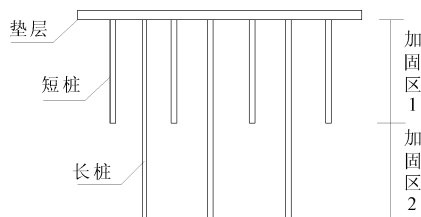


图 2 长短桩复合地基剖面示意

沉降计算公式:

$$S_c = \varphi \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{\xi_1 E_{si}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{p_0}{\xi_2 E_{si}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] \quad (9)$$

式中: n_1 为加固区 1 范围土层分层数; n_2 为加固区 2 范围土层分层数; n_3 为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} 为基础底面下的第 i 层土的压缩模量(MPa); Z_i 、 Z_{i-1} 分别为基础底面计算点至第 i 层土,第 $i-1$ 层土底面的距离(m); $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ 分别为基础底面至第 i 层土,第 $i-1$ 层土至基础底面范围内平均附加应力系数; φ 为沉降计算修正系数,根据

地区沉降观测资料及经验确定; ξ_1 为加固区 1 土的模量提高系数; ξ_2 为加固区 2 土的模量提高系数,计算时分别取值如下:

$$\xi_1 = \frac{f_{sp, k2}}{f_k} \quad (10)$$

$$\xi_2 = \frac{f_{sp, k2}}{f_{sp, k1}} \quad (11)$$

3 设计计算的探讨

3.1 工程概况

太原某商住楼是带有裙房的高层建筑。主楼的平面形状为矩形,东西长约 81 m,南北宽约 18 m。地上 30 层,地下 1 层,剪力墙结构,筏板基础,板底相对标高 -6.76 m。基础底板厚 1.0 m,筏板落在第 2 层粉土层上(见表 1),地下水位约在天然地面以下 1.0 m。由于第二层土具有中等液化,且承载力不能满足上部结构的要求,经过优化比较,整个地基处理采用 CFG 桩与二灰桩相结合的长短桩复合地基形式。其中二灰桩为 $\phi 400$ mm,桩长 7 m,桩端进入 2 层粉土层内;CFG 桩为 $\phi 400$ mm,桩长 18 m,桩端进入 4 层中砂层内。桩间距均为 1 200 mm。

3.2 工程地质条件

据该场地的《工程地质勘察报告》可知,所属地貌单元系汾河东岸二级阶地。典型工程地质物理力学指标如表 1。

表 1 典型工程地质物理力学指标

层数	土层名称	平均层厚 /m	含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E_s /MPa	液化级别	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa	桩侧极限阻力特征值 q_{sa}/kPa
1	杂填土	5.30						
2	粉土	9.80	22.7	20.2	23.89	中等	150	50
3	粉质粘土	8.80	25.5	20.1	20.66		280	55
4	中砂	6.40	饱和		25.12		250	55
5	粉质粘土	5.70	23.4	20.1	27.44		260	
6	中砂	3.70	饱和		30.35		275	
7	粉土	5.70	19.7	21.0	47.03		260	
8	卵石	6.70	饱和		50.38		750	
9	粉质粘土	未穿透	23.4	20.3	28.67		350	

注:表中 E_s 为沉降计算所需的自重压力至自重压力与附加压力之和的压力段的压缩模量。

3.3 工程实例及其设计

按照上部结构设计要求,二灰桩与 CFG 桩复合地基承载力特征值不小于 480 kPa,CFG 桩单桩承载力特征值达到 550 kN。

复合地基的优化设计问题本质就是桩土共同作用问题^[6-7],桩体复合地基设计中采用各类增强体的

材料强度、刚度要远大于基体桩间土体的强度和刚度。当置换率过大,桩体的强度得不到发挥;置换率过小,桩间土体强度得不到充分发挥,因此,需选择与桩土应力比相对应的置换率。本工程中,经过优化设计,整个基础桩位平面布置如图 3,桩间距均为 1 200 mm,长桩、短桩的置换率均为 $m_1 = m_2 = 0.087$ 。

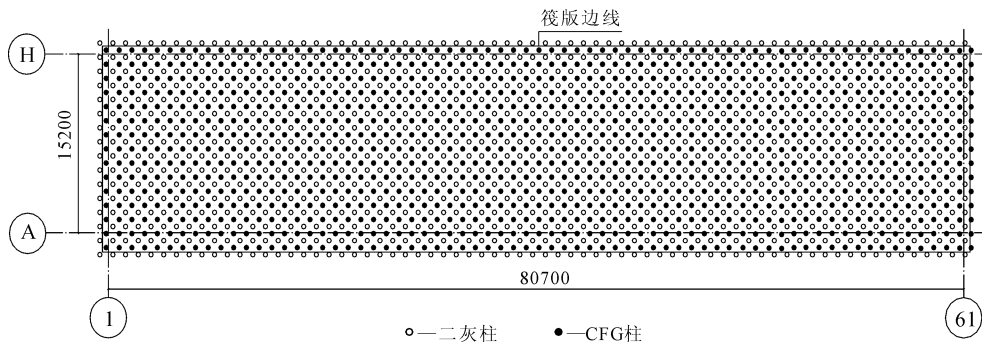


图 3 长短桩复合地基桩位平面布置

3.3.1 复合地基承载力计算

方法一:利用龚晓南课题组计算公式计算

(1) CFG 单桩竖向承载力特征值:

$$R_{a1} = u_p \sum_i q_{si} l_i + A_p q_p = 628.30 \text{ kN}$$

CFG 单桩复合地基承载力特征值:

$$f_{spk1} = m_1 \frac{R_{a1}}{A_{p1}} + (1 - m_1) f_{sk} = 571.9 \text{ kPa}$$

(2) 二灰桩设计

现行地基处理规范中二灰桩桩身抗压极限值 f_{p2k} 可取 350 kPa ~ 500 kPa。此处取为 450 kPa,由桩身截面面积已知,可计算出二灰桩的单桩承载力为 $R_{a2} = 56.5 \text{ kN}$ 。

(3) 长短桩复合地基承载力特征值计算

将上面计算结果代入公式(1)得

$$f_{spk} = m_1 \frac{R_{a1}}{A_{p1}} + \beta_1 m_2 \frac{R_{a2}}{A_{p2}} + \beta_2 (1 - m_1 - m_2) f_{sk} = 443.8 \text{ kPa}$$

此处 β_1, β_2 均取 0.8。

方法二:利用马骥等计算公式计算

(1) 短桩复合地基承载力

$$f_{sp, k1} = \frac{1}{A_1} [\alpha \beta f_k (A_1 - A_{p1}) + R_{k1}] = 155.9 \text{ kPa}$$

(2) 长短桩复合地基承载力

$$f_{sp, k2} = \frac{1}{A_2} [\alpha \beta f_{sp, k1} (A_2 - A_{p2}) + R_{k2}] = 359.9 \text{ kPa}$$

此处 α 取 1.0、 β 取 0.95。

3.3.2 复合地基沉降计算

基础底面处的附加压力为 $p_0 = 370 \text{ kPa}$ 。

方法一:利用龚晓南课题组计算公式计算复合模量与沉降计算的过程见表 2、表 3。

地基沉降计算深度 Z_n 根据规范应满足下列条件:由该深度向上取 1 m 所得的计算沉降量 $\Delta S'_n$ 应满足下式要求:

$$\Delta S'_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta S'_i$$

根据规范计算到第 8 层底满足沉降计算要求,

得总沉降为:

$$S_C = \psi (S_{H_1} + S_{H_2} + S_{H_3}) = 0.2 \times 96.47 = 19.3 \text{ mm}$$

其中 ψ 为沉降计算经验系数,由压缩模量的当量值 $\bar{E}_s = 85.06 \text{ MPa}$ 查表确定。

表 2 复合模量的计算

土层	E_{p1}/MPa	E_{p2}/MPa	E_s/MPa	E_{sp1}/MPa	E_{sp2}/MPa
2-1	30000	20	23.89	2631.5	
2-2	30000		23.89		2631.8
3	30000		20.66		2628.9
4-1	30000		25.12		2632.9

表 3 沉降计算汇总

土层	Z_i/m	L/B	Z_i/B	$4\bar{\alpha}_i$	E_{spi}/MPa	$\Delta S_i/\text{mm}$	$\Sigma \Delta S_i/\text{mm}$
	0	4.5	0.00	1		0.00	0.00
垫层	0.3	4.5	0.03	0.9966	60	1.84	1.84
2-1	7.3	4.5	0.81	0.9640	2631.5	0.95	2.79
2-2	8.34	4.5	0.93	0.9524	2631.8	0.13	2.92
3	17.14	4.5	1.90	0.8186	2628.9	0.86	3.78
4-1	18.3	4.5	2.03	0.8060	2632.9	0.10	3.88
4-2	23.54	4.5	2.62	0.7324	25.12	36.69	40.57
5	29.24	4.5	3.25	0.6700	27.44	31.69	72.25
6	32.94	4.5	3.66	0.6218	30.35	10.87	83.12
7	38.64	4.5	4.29	0.5740	47.03	13.35	96.47

方法二:利用阎明礼等计算公式计算

复合模量与沉降计算的过程见表 4、表 5。

地基沉降计算深度 Z_n 根据规范应满足下列条件:由该深度向上取 1 m 所得的计算沉降量 $\Delta S'_n$ 应满足下式要求:

$$\Delta S'_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta S'_i$$

根据规范计算到第 8 层底满足沉降计算要求,得总沉降为:

$$S_C = \psi (S_{H_1} + S_{H_2} + S_{H_3}) = 0.2 \times 142.32 \\ = 28.5 \text{ mm}$$

其中 ψ 为沉降计算经验系数,由压缩模量的当量值 $\bar{E}_s = 53.25 \text{ MPa}$ 查表确定。

表 4 复合模量的计算

土层	f_{spk} /kPa	$f_{sp,k1}$ /kPa	f_{ak} /kPa	ξ_1	ξ_2	E_s /MPa	E_{spi} /MPa
2-1	598.0		150	3.99		23.89	95.32
2-2		571.9	150		3.81	23.89	91.02
3		571.9	150		3.81	20.66	78.71
4-1		571.9	150		3.81	25.12	95.71

表 5 沉降计算汇总

土层	Z_i /m	L/B	Z_i/B	$4\bar{\alpha}_i$	E_{spi} /MPa	ΔS_i /mm	$\Sigma \Delta S_i$ /mm
	0	4.5	0.00	1		0.00	0.00
垫层	0.3	4.5	0.03	0.9966	60	1.84	1.84
2-1	7.3	4.5	0.81	0.9640	95.32	26.16	28.00
2-2	8.34	4.5	0.93	0.9524	91.02	3.68	31.68
3	17.14	4.5	1.90	0.8186	78.71	28.62	60.30
4-1	18.3	4.5	2.03	0.8060	95.71	2.78	63.08
4-2	23.54	4.5	2.62	0.7324	25.12	36.69	99.77
5	29.24	4.5	3.25	0.6700	27.44	31.69	131.46
6	32.94	4.5	3.66	0.6218	30.35	10.87	142.32

3.4 实测沉降数据与理论计算的对比

沿整个住宅楼的外墙均匀布置 16 个沉降观测点,测点的值基本均匀。实测沉降观测结果见表 6,其中 S_{\min} 为最小累计沉降, S_{\max} 为最大累计沉降, S 为平均沉降。

表 6 实测沉降观测结果

观测次数	工程情况	S_{\min} /mm	S_{\max} /mm	S /mm
1	初始测量	0	0	0
2	一层顶板施工完毕	0	2	1
3	三层顶板施工完毕	4	7	5
4	五层顶板施工完毕	6	9	7
5	七层顶板施工完毕	9	12	10
6	九层顶板施工完毕	9	12	10
7	十一层顶板施工完毕	9	13	11
8	十三层顶板施工完毕	9	18	13
9	十五层顶板施工完毕	10	22	15
10	十七层顶板施工完毕	10	25	16
11	十九层顶板施工完毕	10	26	17
12	二十一层顶板施工完毕	10	26	17
13	二十三层顶板施工完毕	10	27	18
14	二十五层顶板施工完毕	11	28	20
15	二十七层顶板施工完毕	11	31	22
16	二十九层顶板施工完毕	11	33	22
17	三十层顶板施工完毕	17	45	31

4 结 语

设计计算与实测数据的对比见表 7。

表 7 设计计算与实测对比

承载力/kPa			变形/mm					
理论 值 1	理论 值 2	实测 值	沉降 统计	理论 值 1	每区沉降 比例/%	理论 值 2	每区沉降 比例/%	实测 值
			S1 区	2.79	2.9	28.0	19.7	
			S2 区	1.09	1.1	35.1	24.7	
444	360	480	S3 区	92.6	96.0	79.2	55.6	31
			合计	96.5	100	142.3	100	
			乘系 数 ψ	19.3		28.5		

从表 7 中工程实例的数据分析,可以得到以下结论:

根据该工程实例计算结果来看,承载力采用龚晓南课题组的计算方法与实测承载力大小比较接近,沉降计算采用阎明礼的计算方法与实测值比较接近。采用龚晓南课题组的计算方法进行沉降计算, S1 区与 S2 区沉降之和仅占总沉降的 4.0%,而采用阎明礼的计算方法, S1 区与 S2 区沉降之和可达总沉降的 44.4%。可见不同的计算方法有不同的适用条件。目前有关长、短桩复合地基承载力和沉降计算的理论研究严重滞后于工程实践,无法更好的发挥其指导作用。现行各种计算方法仍然不够完善,各种方法的适用性及相关参数的取值还需要大量实例验证。进一步深入探讨长、短桩复合地基的承载力和沉降计算对于开发和推广其工程应用具有重要的理论和工程意义。

参考文献:

- [1] 葛忻声,龚晓南.长短桩复合地基设计计算方法的探讨[J].建筑结构,2002,(7):3-5.
- [2] 马骥,张东刚,张震,等.长短桩复合地基设计计算[J].岩土工程技术,2001,(2):86-91.
- [3] 中国建筑科学研究院.JGJ79-2002.建筑地基处理技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002:1-200.
- [4] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:1-371.
- [5] 阎明礼,张东刚.CFG 桩复合地基技术及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001:1-351.
- [6] 戴民,周云东,张霆,等.桩土相互作用研究综述[J].河海大学学报,2006,34(5):12-16.
- [7] 吴永红,等.桩土相互作用研究进展与若干问题探讨[C].天津市:河北省首届岩土工程学术会议,2004.