

多桩型复合地基设计计算方法探讨

Study on the calculation method of multi-type-pile composite foundation

闫明礼¹, 王明山¹, 闫雪峰², 张东刚¹

(1. 中国建筑科学研究院地基所, 北京 100013; 2. 冶金部建筑研究总院地基所, 北京 100088)

摘要: 讨论了多桩型复合地基及其复合模量的基本概念。介绍了多桩型复合地基承载力和变形的计算方法。

关键词: 多桩型复合地基; 复合模量; 承载力; 变形

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)03-0352-04

作者简介: 闫明礼(1942-), 男, 河北乐亭人, 博士生导师, 国际土力学学会会员, 1966年毕业于天津大学水港专业, 1981年获中国建筑科学研究院岩土工程专业硕士学位, 现在中国建筑科学研究院地基所从事土的工程性质、地基处理等领域的研究开发工作。

YAN Ming-li¹, WANG Ming-shan¹, YAN Xue-feng², ZHANG Dong-gang¹

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Central Research Institute of Building & Construction, IMM, Beijing 100088, China)

Abstract: The authors discuss the basic conception about multi-type-pile composite foundation and composite modulus, and recommend the calculation methods on bearing capacity and deformation.

Key words: multi-type-pile composite subgrade; composite modulus; bearing capacity; deformation

0 前言^y

复合地基中的纵向增强体习惯上称作桩, 由两种或两种以上桩型组成的复合地基称为多桩型复合地基。比如, 对可液化地基, 为消除地基液化, 可采用振动沉管碎石桩或振冲碎石桩方案。但当建筑物荷载较大而要求加固后的复合地基承载力较高, 单一碎石桩复合地基方案不能满足设计要求的承载力时, 可采用碎石桩和刚性桩(如 CFG 桩)组合的多桩型复合地基方案。这种多桩型复合地基既能消除地基液化, 又可以得到很高的复合地基承载力。

又如, 当地基土有两个好的桩端持力层, 分别位于基底以下深度为 Z_1 (I 层) 和 Z_2 (II 层) 的土层, 且 $Z_1 < Z_2$ 。在复合地基合理桩距范围内, 若桩端落在 I 层时, 复合地基不能满足设计要求。若桩端落在 II 层时, 复合地基承载力又过高, 偏于保守。此时, 可考虑将部分桩的桩端落在 I 层上, 另一部分桩的桩端落在 II 层上, 形成长短桩复合地基。

采用 CFG 桩复合地基方案, 有时会发现基底下部分土质较差, 需用水泥土桩补强, 以调整整个复合地基承载力和模量的均匀性, 也形成了多桩型复合地基。

工程中单一桩型复合地基的设计计算方法相对比较成熟。但对于两种或两种以上桩型的多桩型复合地基、长短桩复合地基承载力和变形如何计算, 还需要做进一步工作。本文将就此进行探讨。

多桩型复合地基和长短桩复合地基设计计算方法完全相同。用于多桩型复合地基的计算公式, 对长短桩复合地基也适用。

1 多桩型复合地基承载力计算

为研究方便, 将复合地基中荷载分担比高的桩型定义为主控桩(桩的模量相对较高, 桩相对较长)。其余桩型为辅桩, 并按荷载分担比由大到小排序。工程中常用的是两种桩型组成的复合地基(或长短桩复合地基)。

下面先就两种桩型组成的复合地基承载力计算公式进行推导, 并可推广到两种以上桩型的复合地基。基本思路为:

(1) 由天然地基和主控桩复合形成复合地基, 视为一种新的等效天然地基, 其承载力特征值为 f_{spk1} 。

(2) 将等效天然地基和辅桩复合形成复合地基, 求得复合地基承载力即两种桩型复合地基承载力。

具体推导如下

基础下天然地基土的承载力特征值为 f_{ak} 。主控桩的断面面积为 A_{p1} , 平均面积置换率为 m_1 , 单桩承载力特征值为 R_{a1} 。则主控桩和天然地基形成的复合地基承载力特征值为

$$f_{spk1} = m_1 \frac{R_{a1}}{A_{p1}} + \alpha_1 \beta_1 (1 - m_1) f_{ak} \quad (1)$$

式中 α_1 为桩间土承载力提高系数, 与土性和主控桩成桩工艺及主控桩的桩径、桩距等有关。对非挤土成桩工艺, $\alpha_1 = 1$; β_1 为桩间土承载力发挥系数, 一般 $\beta_1 \leq 1$ 。

基础下辅桩的断面面积为 A_{p2} , 平均面积置换率为 m_2 , 单桩承载力特征值为 R_{a2} 。辅桩与承载力特征

值为 f_{spk1} 的等效天然地基复合后的承载力即为多桩型复合地基承载力,即

$$f_{\text{spk}} = m_2 \frac{R_{\text{a2}}}{A_{\text{p2}}} + \alpha_2 \beta_2 (1 - m_2) f_{\text{spk1}} = m_2 \frac{R_{\text{a2}}}{A_{\text{p2}}} + \alpha_2 \beta_2 m_1 (1 - m_2) \frac{R_{\text{a1}}}{A_{\text{p1}}} + \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 (1 - m_1) (1 - m_2) f_{\text{ak}} \quad (2)$$

式中 f_{spk} 为多桩型复合地基承载力特征值; α_2 为桩间土承载力提高系数,与土性和辅桩成桩工艺以及辅桩的桩径、桩距等有关。对非挤土成桩工艺, $\alpha_2 = 1$; β_2 为桩间土承载力发挥系数,一般 $\beta_2 \leq 1$ 。

2 复合地基的复合模量

复合模量表征的是复合土体抵抗变形的能力。由于复合地基是由土和增强体(桩)组成,故复合模量与土的模量和桩的模量密切相关。

这里所述土的模量是指土的压缩模量,桩的模量是反映桩抵抗变形能力大小的量。

桩与土形成的复合模量在使用上可理解为复合土体的压缩模量。并可用于按单向分层总和法计算复合地基的变形。

2.1 单一桩型复合地基的复合模量

许多文献都用桩和土的模量的叠加来表达复合地基的复合模量,其表达式为

$$E_{\text{sp}} = mE_{\text{p}} + (1 - m)E_{\text{s}} \quad (3)$$

式中 E_{sp} 为复合地基的复合模量; m 为面积置换率; E_{s} 为加固后桩间土的压缩模量; E_{p} 为桩体的压缩模量。

需要指出的是,式(3)在特定的条件下才成立,即①复合地基上的基础无限大,且绝对刚性;②桩端落在坚硬的土层上,桩没有向下的刺入变形;③桩长 L 是有限的。

上述的特定条件在工程中是少见的,因此式(3)中用桩体材料本身的压缩模量将会产生很大的误差。

比如,对中高黏结强度桩,两个复合地基中的桩体材料相同(E_{p} 相同),桩长不同,桩长范围内的土的压缩模量 E_{s} 相同,面积置换率相同,按式(3)求得两个复合地基的复合模量是相同的。实际上,桩越长复合模量越高。而式(3)没有反映出桩长效应。类似地,桩体材料相同(E_{p} 相同),桩长相同,桩长范围内的土的压缩模量 E_{s} 相同,面积置换率相同的两个复合地基,一个桩端落在坚硬土层上,一个桩端落在软土层上,按式(3)求得的复合模量也是相同的。实际上,桩端落在坚硬土层上的复合地基的复合模量要高。而式(3)没有反映出桩的端阻效应。

又如文献[1]的资料,CFG桩复合地基桩的面积置

换率 $m = 0.064$,天然地基土的压缩模量 $E_{\text{s}} = 3 \text{ MPa}$,桩身模量 $E_{\text{p}} = 8750 \text{ MPa}$,按式(3)求得的复合模量 $E_{\text{sp}} = 562.8 \text{ MPa}$ 。基底压力为 120 kPa 时计算出的复合土层及下卧层总变形量不到 1 mm ,而实际为 25 mm 。显然用桩体模量按式(3)求得的复合模量偏大太多。

下面将重点讨论一下桩模量的物理意义,以便合理确定复合地基的复合模量。

建筑物荷载 P 通过基础将荷载传到桩和桩间土上,桩顶应力为 σ_{p} ,桩间土平均应力为 σ_{s} 。桩在荷载作用下,桩顶产生竖向位移 S ,且 S 由两部分组成,其一是桩体本身的压缩变形量 S_{c} ,其二是桩克服土的侧阻和端阻产生的刚体位移量 S_{s} ,即 $S = S_{\text{c}} + S_{\text{s}}$ 。桩的模量应是桩顶应力与桩的相对变形之比。这个相对变形量既包含桩本身的压缩量 S_{c} 也包含桩顶刚性位移量 S_{s} 。或者说桩抵抗变形的能力由两部分组成,一部分是桩体本身抵抗变形的能力,另一部分是桩侧和桩端土抵抗变形的能力。对桩的模量起控制作用的是桩体本身还是桩侧及桩端土,主要取决于桩身材料的性质。

对于由散体材料构成的桩(如碎石桩、砂石桩)和一般黏结强度的桩(如石灰桩), S_{c} 和 S_{s} 在桩顶总位移量 S 中的比例都是不可忽略的。桩的模量既取决于桩体本身抵抗变形的能力,也取决于桩侧、桩端土的作用。

对于刚性桩复合地基(如CFG桩),桩身模量很高。在工程中常遇到的荷载水平下, S_{c} 可近似等于 0,即 $S = S_{\text{s}}$ 。这时对桩的模量起控制作用的不是桩体本身,而是桩侧、桩端土。或者说刚性桩复合地基的模量主要是桩的几何尺寸和土的性质反映。

由以上讨论可知,式(3)中 E_{p} 用桩体压缩模量计算复合地基复合模量是不妥的,且桩体强度越高误差越大(新地基处理规范中,旋喷桩复合地基复合模量公式已经取消)。

工程中直接测定桩的模量是困难的。参考文献[1~3]根据桩土荷载分担比与桩土模量的相关性,用土模量的某个倍数来表征桩的模量,建议一个复合模量表达式。当荷载接近或达到复合地基承载力时,假定:

(1) 桩土应力比等于桩土模量比,即 $E_{\text{p}}/E_{\text{s}}' = n$ (E_{s}' 为加固后桩间土模量, n 为桩土应力比)。

(2) 加固后桩间土模量 E_{s}' 是加固前天然地基模量 E_{s} 的 α 倍,即 $E_{\text{s}}' = \alpha E_{\text{s}}$ 。 α 为桩间土承载力提高系数。

(3) 复合模量按下式组合:

$$E_{\text{sp}} = mE_{\text{p}} + (1 - m)E_{\text{s}}' = [1 + m(n - 1)]\alpha E_{\text{s}} \quad (4)$$

令 $\zeta = [1 + m(n - 1)]\alpha$, 上式为

$$E_{\text{sp}} = \zeta E_{\text{s}} \quad (5)$$

故复合地基承载力表达式为

$$f_{\text{spk}} = [1 + m(n - 1)] f_{\text{ak}} = \zeta f_{\text{ak}}, \quad (6)$$

$$\zeta = f_{\text{spk}} / f_{\text{ak}}. \quad (7)$$

ζ 既是承载力提高系数, 也是模量提高系数。工程中, 根据地质报告提供的天然地基承载力 f_{ak} 和压缩模量 E_s , 加固后测得复合地基承载力后便可求得模量提高系数 $\zeta = f_{\text{spk}} / f_{\text{ak}}$, 则复合模量按式(5)求得。

2.2 多桩型复合地基的复合模量

下面仍以两种桩型为例, 给出多桩型复合地基复合模量的确定方法。基本思路为:

(1) 按单一桩型复合地基复合模量确定方法求得天然地基和主控桩所形成复合地基的复合模量, 并将之视为一等效天然地基。

(2) 同样按单一桩型复合地基确定方法, 求得等效天然地基和辅桩形成的复合地基的复合模量即为多桩型复合地基的复合模量。具体求法如下:

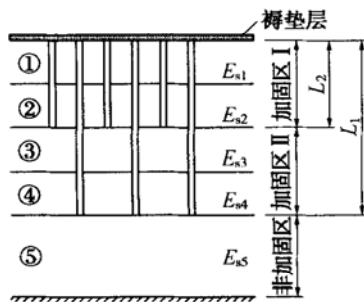


图 1 多桩型复合地基示意图

Fig. 1 Multi-type pile composite foundation

① 确定主控桩和天然地基土形成的复合模量

图 1 给出了两种桩型(或长短桩)的复合地基。主控桩桩长为 L_1 , 辅桩桩长为 L_2 。 L_2 范围为加固区 I, $(L_1 - L_2)$ 范围为加固区 II。 L_1 以下为非加固区。计算深度范围内共分五个土层, 各层天然地基土压缩模量分别为 $E_{s1}, E_{s2}, E_{s3}, E_{s4}$ 和 E_{s5} , 如图 2。主控桩和天然地基形成复合地基后的面积置换率为 m_1 , 第 ① 层土天然地基承载力特征值为 f_{ak} , 主控桩加固后复合地基承载力特征值为 f_{spk1} , 模量提高系数 $\zeta_1 = f_{\text{spk1}} / f_{\text{ak}}$, 主控桩桩长 L_1 范围内各层土的压缩模量均乘以 ζ_1 , 各层土模量见图 4。并将之视为一新的等效天然地基。

② 确定多桩型复合地基的复合模量

桩长为 L_2 的辅桩和图 4 所示的等效天然地基形成新的复合地基, 如图 5 所示。复合地基面积置换率为 m_2 (计算 m_2 时不考虑主控桩的存在)。复合地基承载力特征值为 f_{spk} , 则桩长 L_2 范围内模量提高系数为 $\zeta_2 = f_{\text{spk}} / f_{\text{spk1}}$ 。将 L_2 范围内图 4 所示各层土的模量均乘以 ζ_2 得加固后各土层的模量如图 6 所示。

①	E_{s1}
②	E_{s2}
③	E_{s3}
④	E_{s4}
⑤	E_{s5}

图 2 天然地基各土层压缩模量

Fig. 2 The modulus of compressibility of soil in each stratum

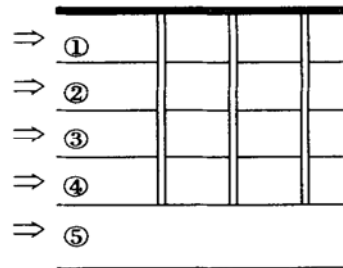


图 3 主控桩和天然地基形成的复合地基

Fig. 3 The composite foundation with major-pile and natural foundation

①	$\zeta_1 E_{s1}$
②	$\zeta_1 E_{s2}$
③	$\zeta_1 E_{s3}$
④	$\zeta_1 E_{s4}$
⑤	E_{s5}

图 4 等效天然地基各土层模量

Fig. 4 The modulus of compressibility of soil in equivalent natural foundation

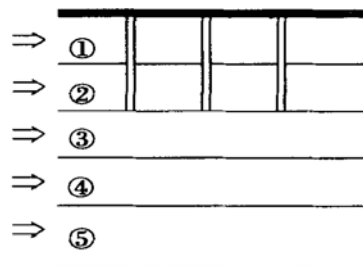


图 5 辅桩与等效天然地基形成的复合地基

Fig. 5 The composite foundation with minor-pile and equivalent natural foundation

①	$\zeta_2 \zeta_1 E_{s1}$
②	$\zeta_2 \zeta_1 E_{s2}$
③	$\zeta_1 E_{s3}$
④	$\zeta_1 E_{s4}$
⑤	E_{s5}

图 6 多桩型复合地基各土层模量

Fig. 6 The modulus of compressibility of soil in multi-type pile composite foundation

注意到 $\zeta_1 \zeta_2 = (f_{\text{spk}}/f_{\text{spk1}})(f_{\text{spk1}}/f_{\text{ak}}) = (f_{\text{spk}}/f_{\text{ak}})$, 令 $\eta = \zeta_1 \zeta_2$, 则加固区 I 范围内模量提高系数 $\eta = \zeta_1 \zeta_2 = f_{\text{spk}}/f_{\text{ak}}$ 。加固区 II 的模量提高系数为 ζ_1 , 非加固区模量不变。两种桩型以上的复合地基模量可以此类推。

3 多桩型复合地基变形计算

复合地基属地基范畴, 沿用《建筑地基基础设计规范》变形计算方法, 既可以利用我国几十年来积累的工程经验, 又可使计算方法简单, 便于技术人员掌握。

为讨论方便, 仍首先给出两种桩型复合地基变形计算方法, 并以此类推。其基本步骤为

(1) 按各向同性均质线性变形体理论求附加应力。

(2) 求如图 1 所示加固区 I 和加固区 II 模量提高系数 η 和 ζ_1 , 得到如图 6 所示得等效天然地基。等效天然地基分层与原天然地基相同, 各分层的模量为: 加固区 I: 各分层模量等于原天然地基各分层模量乘以 η ; 加固区 II: 各分层模量等于原天然地基各分层模量乘以 ζ_1 ; 非加固区: 各分层模量与原天然地基各分层模量相同。

(3) 按《建筑地基基础设计规范》GB50007—2002 计算图 6 所示天然地基的最终变形量, 即为多桩型复合地基变形。地基变形计算深度必须大于复合土层厚度, 并满足《建筑地基基础设计规范》GB50007—2002 地基变形计算深度的有关规定。其中沉降经验系数 Ψ_s 可根据地区经验确定, 无地区经验时可采用表 1 的数值。

表 1 沉降经验系数 Ψ_s

Table 1 Empirical coefficient of settlement Ψ_s

$\bar{E}_s/\text{MPa}$	2.5	4.0	7.0	15	20
Ψ_s	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

注: $\bar{E}_s$ 为图 6 等效天然地基计算深度范围内压缩模量当量值。

4 工程实例

某工程位于北京朝阳区, 该建筑地上 22 层, 地下 2 层, 剪力墙结构、箱型基础。基础埋深 4.46 m, 基底压力标准值为 370 kN/m^2 , 设计除满足承载力要求外, 还要求建筑物变形不大于 50 mm 、倾斜不大于 0.002 。地基土物理力学指标如表 2 所示。

本工程采用多桩型复合地基。辅桩为桩径 400 mm 的 CFG 桩, 桩长 $6.2 \sim 7.2 \text{ m}$, 桩端进入 ③层中、细砂, 桩身强度等级为 C15。采用振动沉管打桩机施工, 目的是用振动成桩工艺加固基底下部的填土。

主控桩为桩径 400 mm 、桩长 $18 \sim 18.5 \text{ m}$ 的 CFG 桩, 桩身强度等级为 C20, 桩端进入 ⑥层中、细砂。采用长螺旋钻管内泵压混合料成桩工艺。施工时, 先打沉管 CFG 桩, 后打长螺旋钻管内泵压 CFG 桩。施工后

经现场静载试验得: $R_{a1} = 650 \text{ kN}$, $R_{a2} = 190 \text{ kN}$ 。

表 2 地层的物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical parameters of the soil

土层	w /%	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	e	I_L	压缩模量 E_s/MPa			f_{ak} /kPa
					100~200	200~300	300~400	
①								
②	25.9	19.8	0.73	0.72	8.0	10.0	12.0	170
③					20.0	22.0	24.0	22.0
④	21.4	20.6	0.60	0.22	10.0	12.0	14.0	190
⑤	26.9	19.3	0.80	0.23	9.0	11.0	13.0	180
⑥					25.0	27.0	30.0	280
⑦	21.8	20.8	0.58	0.23	9.0	11.0	13.0	180
⑧					30.0	33.0	36.0	340

注: ①填土; ②粉质黏土、粉土; ③中、细砂; ④粉土; ⑤黏土粉土互层; ⑥中、细砂; ⑦黏土、粉土; ⑧砾砂。

基础底面下填土承载力和压缩模量经验值分别为 $f_{\text{ak}} = 90 \text{ kPa}$, $E_s = 4 \text{ MPa}$ 。主控桩与天然地基形成的复合地基承载力特征值 $f_{\text{spk1}} = 330 \text{ kPa}$, 长短桩复合地基承载力特征值 $f_{\text{spk}} = 428 \text{ kPa}$ 。求得加固区 I 的模量提高系数为 $\eta = \zeta_1 \zeta_2 = 428/90 = 4.76$, 加固区 II 的模量提高系数为 $\zeta_1 = 330/90 = 3.67$ 。计算的复合地基变形量为 35.7 mm 。沉降观测表明, 建筑物封顶时建筑物沉降量为 $13.4 \sim 20 \text{ mm}$, 根据北京地区经验, 封顶时沉降量为最终沉降量的 $50\% \sim 70\%$, 该建筑物最终沉降量为 $30 \sim 40 \text{ mm}$, 与计算结果相吻合。

5 结 语

(1) 从工程实用角度出发, 本文建议的多桩型复合地基承载力和变形计算方法, 已被较多的工程实例证实是可行的。

(2) 不少地质条件, 采用多桩型复合地基, 具有良好的技术经济效益。

(3) 进一步认识多桩型复合地基承载和变形特性, 除机理研究外, 尚需要积累更多工程实例, 特别是完整的沉降观测资料, 使设计计算方法不断完善和优化。

参考文献:

- [1] 闫雪峰. 复合地基设计若干问题和沉降计算[D]. 天津: 天津大学, 1999.
- [2] 闫雪峰, 闫明礼. 复合地基沉降计算的复合模量探讨[A]. 第六届地基处理学术讨论会暨第二届基坑工程学术讨论会论文集[C]. 2000. 3~8.
- [3] 闫明礼, 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. 27~33.
- [4] 陈 磊, 闫明礼. 组合桩复合地基在工程中的应用[J]. 工程勘察, 1999, (1): 24~26.
- [5] 马 骥, 等. 长短桩复合地基设计计算[J]. 岩土工程技术, 2001, (2): 86~91.