

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.13

一种新的桩间土承载力特征值的估算方法

周志军¹, 郑昊², 王连坤¹

(1. 五邑大学土木建筑学院, 广东 江门 529020;

2. 湖北省通山县交通建设工程质量监督站, 湖北 通山 437600)

摘要: 在复合地基设计中, 多层土的桩间土承载力特征值如何准确估算, 一直困扰着工程设计人员。论文针对工程中三种经验估算方法的不足, 依据国家及行业规范要求, 通过力学分析、推导, 提出一种新的复合地基桩间土承载力特征值的估算方法, 并通过算例进行了验证。

关键词: 复合地基; 桩间土; 承载力特征值; 估算

中图分类号: TU470⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0084-06

A new method for estimating the characteristic values of soil's bearing capacity between piles

ZHOU Zhijun¹, ZHENG Hao², WANG Liankun¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China;

2. Traffic Construction Engineering Quality Supervision Station of Tongshan County, Tongshan, Hubei 437600, China)

Abstract: In the design of composite foundation, how to accurately estimate the bearing capacity of soil among piles is still puzzling the engineering designers. Aiming at the lack of three kinds of empirical estimation methods in engineering, a new kind of estimation method is proposed on bearing capacity characteristic values of soil among piles in composite foundation, based on the national and profession standards. Mechanical analysis and derivation are carried out and the correctness of the method is verified with calculation examples. The method is more rigorous than the existing empirical estimation method, and the calculation results are more reasonable and reliable. The method can be used by engineering designers for reference.

Keywords: composite foundation; soil between piles; bearing capacity characteristic value; estimation

在复合地基设计中, 由于桩体置换率通常较小, 所以当复合地基承载力一定时, 处理后桩间土承载力特征值 f_{sk} 的大小将显著影响桩体的用量, 因此, f_{sk} 是复合地基设计中必须谨慎取值的重要参数。然而, f_{sk} 的影响因素是复杂的。佟建兴等分析了桩的约束作用和负摩擦区对桩间土承载力特征值的影响^[1]; 郑刚等通过水泥搅拌桩复合地基的研究发现桩长、桩距、褥垫层等与桩间土承载力的大小具有紧密关系^[2], 此外, 复合地基施工过程中的振动和挤密作用也是很重要的影响

因素。所以, 《建筑地基处理技术规范》规定: 应在有代表性的场地上进行现场试验或试验性施工, 以确定各设计参数和处理效果^[3]。工程设计中如果有前期现场试验资料, 当然最好, 但有时候往往缺少相关试验资料, 规范^[3]根据这种情况给出了在初步设计时复合地基承载力的估算公式, 其中, 建议 f_{sk} 在缺少试验资料时可按地区经验确定。

目前, 多层土情况下 f_{sk} 的经验确定方法在工程设计中主要有三种: ① f_{sk} 取持力层的承载力特征值; ② f_{sk}

收稿日期: 2017-06-30; 修订日期: 2017-08-24

基金项目: 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目资助(2012LYM_0128); 五邑大学 2014 年青年科研基金项目资助(2014zk12)

第一作者: 周志军(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事道路与地基处理方面的教学和研究。E-mail: zzzjwyu@163.com

取复合地基加固范围内各土层承载力特征值的最小值;③ f_{sk} 取复合地基加固范围内各土层承载力特征值的厚度加权平均值。这三种 f_{sk} 经验估算方法哪种更合理,鲜有文献专门论述。《岩土论坛》、《土木在线论坛》曾有过讨论,但没有统一意见,难以判别好坏,所以仍然困扰着工程设计人员。本文针对现有 f_{sk} 经验估算方法的不足,依据国家及行业规范要求,通过力学分析、推导,提出一种新的桩间土承载力特征值的估算方法,并通过算例验证了其正确性。本文方法虽然不能解析 f_{sk} 的真实大小,但作为估算方法,能方便广大工程设计人员参考、使用。

1 公式推导

如前所述,桩间土承载力如果考虑桩体等诸多因素的影响,虽然能反映桩间土的真实承载性状,但计算起来比较麻烦。因此,在缺乏现场试验资料的情况下,规范^[3]给出了初步设计时复合地基承载力特征值 f_{spk} 的估算公式:

$$\begin{cases} f_{spk} = [1 + m(n-1)]f_{sk} & (\text{散体材料}) \\ f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} & (\text{粘结材料}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值;

n ——复合地基桩土应力比;

m ——面积置换率;

λ ——单桩承载力发挥系数;

R_a ——单桩竖向承载力特征值;

A_p ——桩的截面积;

β ——桩间土承载力发挥系数。

从公式中看出:复合地基承载力是桩体实际发挥承载力和桩间土实际发挥承载力按面积比例的组合值。参数 n, λ, β 的大小反映了桩、土的发挥程度。处理后的桩间土承载力特征值 f_{sk} 与原土强度、类型、施工工艺密切相关^[3]。因此,根据规范公式的计算思路,本文把桩间土单独出来考虑,忽略桩间土与桩体之间复杂的相互作用关系,暂不考虑成桩工艺的影响,仅把桩间土假定为天然地基土来研究。下面以矩形基础作用于多层地基的情况进行分析,如图1所示。已知各层土的承载力特征值 f_{ak} ,土层1为持力层,假定土层2和土层3为软弱下卧层,承载力特征值满足 $f_{ak,2} < f_{ak,1}, f_{ak,3} < f_{ak,1}$ 。

在基础荷载的作用下,基底下每层土都处于受力状态。先把土层1隔离出来,假定土层1以下地基承载力特征值 $f_{ak,2} = f_{ak,3} = \infty$,那么,当基底压力 $p_{k,1}$ 满足

下式时,土层1刚好达到正常使用极限状态:

$$p_{k,1} = f_{ak,1} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) \quad (2)$$

式中: $f_{ak,1}$ ——土层1的承载力特征值;

b ——矩形基底面宽度;

d ——基础埋深;

γ ——基底下持力层土的重度;

γ_m ——基底面以上土的加权平均重度;

η_b, η_d ——基础宽度、深度的承载力修正系数,按持力层土的种类来取值。

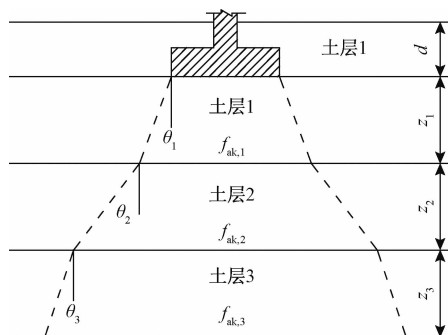


图1 地基土层情况

Fig.1 Soil condition of the ground

然后,把土层2隔离出来,假定土层1和土层3的承载力特征值 $f_{ak,1} = f_{ak,3} = \infty$ 。由于 $f_{ak,2} < f_{ak,1}$,根据《建筑地基基础设计规范》^[4]需要验算软弱下卧层的承载力。由压力扩散原理,当基底压力为 $p_{k,2}$ 时,土层2顶面的附加压力值为:

$$p_z = \frac{(p_{k,2} - p_c)bl}{(b + 2z_1 \tan \theta_1)(l + 2z_1 \tan \theta_1)} \quad (3)$$

式中: p_z ——所计算下卧层顶面处的附加压力值;

p_c ——基底处土的自重压力, $p_c = \gamma_m d$;

l ——矩形基底面长度;

z_1 ——土层2顶面至基底面的距离;

θ_1 ——土层1的压力扩散角,其值按 $j=1$ 查表1,根据 z_1/b 和 E_{s1}/E_{s2} 得到,其他符号同前。

需要说明的是,表1适用于地基上硬下软情况下压力扩散的计算;当 $E_{sj}/E_{s(j+1)} < 1$ 时,地基上软下硬,存在应力集中现象,近似取扩散角 $\theta = 0$;当 $1 < E_{sj}/E_{s(j+1)} < 3$ 时,地基接近均质土层,可近似按附加应力系数法求解^[5]。

根据规范^[4]5.2.7条,当满足公式(4)时,基底压力 $p_{k,2}$ 作用下土层2刚好达到正常使用极限状态。

$$p_z + p_{cz} = f_{az} \quad (4)$$

式(4)中 p_{cz} 为所计算下卧层顶面处土或换填材料的自

表 1 地基压力扩散角 θ_j 取值Table 1 Diffusion angle θ_j of the ground pressure

$E_{sj}/E_{s(j+1)}$	z_j/b	
	0.25	0.5
3	6	23
5	10	25
10	20	30

注:(1) E_{sj} 为上层土压缩模量, $E_{s(j+1)}$ 为下层土压缩模量;(2) $z_j/b < 0.25$ 时取 $\theta_j = 0^\circ$, 必要时, 宜由试验确定; $z_j/b > 0.50$ 时 θ_j 值不变;(3) z_j/b 在 0.25 与 0.50 之间可插值使用。

重压力值, 此处取:

$$p_{cz} = \gamma'_m (d + z_1) \quad (5)$$

其中, γ'_m 为所计算下卧层顶面以上土或换填材料的加权平均重度, 位于地下水位以下的土或换填材料取有效重度, 其他符号同前。

式(4)中 f_{az} 为所计算下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值, 按下式计算:

$$f_{az} = f_{ak,2} + \eta'_d \gamma'_m (d + z_1 - 0.5) \quad (6)$$

式中: $f_{ak,2}$ ——土层 2 的承载力特征值;

η'_d ——所计算下卧层的承载力深度修正系数。

把式(3)、式(5)、式(6)代入式(4)可得:

$$p_{k,2} = \gamma_m d + \frac{(b + 2z_1 \tan \theta_1)(l + 2z_1 \tan \theta_1)}{bl} \times [f_{ak,2} + \eta'_d \gamma'_m (d + z_1 - 0.5) - \gamma'_m (d + z_1)] \quad (7)$$

同理, 把土层 3 隔离出来分析, 假定土层 1 和土层 2 的承载力特征值 $f_{ak,1} = f_{ak,2} = \infty$, 当基底压力为 $p_{k,3}$ 时, 土层 3 顶面的附加压力值为:

$$p_z = \frac{(p_{k,3} - p_c) \times bl \times (l + 2z_1 \tan \theta_1 + 2z_2 \tan \theta_2)^{-1}}{(b + 2z_1 \tan \theta_1 + 2z_2 \tan \theta_2)} \quad (8)$$

式中: z_2 ——土层 3 顶面至土层 2 顶面的距离;

θ_2 ——土层 2 压力扩散角, 按 $z_2/(b + 2z_1 \tan \theta_1)$ 和 E_{s2}/E_{s3} 的值查表 1 得到; 其他符号同前。

土层 3 顶面处土的自重压力为:

$$p_{cz} = \gamma'_m (d + z_1 + z_2) \quad (9)$$

土层 3 深度修正后的承载力特征值为:

$$f_{az} = f_{ak,3} + \eta'_d \gamma'_m (d + z_1 + z_2 - 0.5) \quad (10)$$

当基底压力 $p_{k,3}$ 达到一定值, 土层 3 刚好达到正常使用极限状态, 则可求得:

$$p_{k,3} = \gamma_m d + \frac{(b + 2z_1 \tan \theta_1 + 2z_2 \tan \theta_2)}{bl} \times [(l + 2z_1 \tan \theta_1 + 2z_2 \tan \theta_2) \times [f_{ak,3} + \eta'_d \gamma'_m (d + z_1 + z_2 - 0.5) - \gamma'_m (d + z_1 + z_2)]] \quad (11)$$

分析式(2)、式(7)、式(11), 当土层 i 达到正常使

用极限状态时, 基底压力 $p_{k,i}$ 的一般通式为:

$$\begin{cases} p_{k,1} = f_{ak,1} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5), i = 1 \\ p_{k,i} = K_p [f_{ak,i} + \eta'_d \gamma'_m (d + \sum_{j=1}^{i-1} z_j - 0.5) - \gamma'_m (d + \sum_{j=1}^{i-1} z_j)] + \gamma_m d, i \geq 2 \\ K_p = \frac{(b + \Delta_{i-1})(l + \Delta_{i-1})}{bl} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $f_{ak,i}$ ——土层 i 的承载力特征值;

$\sum_{j=1}^{i-1} z_j$ ——土层 i 顶面与基础底面之间的距离;

Δ_{i-1} ——基底压力的扩散宽度, $\Delta_{i-1} =$

$$2 \sum_{j=1}^{i-1} (z_j \tan \theta_j);$$

K_p ——扩散系数, 其他符号同前。

假定持力层的承载力特征值还有很多虚拟值 $f'_{ak,i}$, 满足公式(12)下卧层 i 计算的基底压力等于虚拟值条件下持力层的基底压力, 可列方程:

$$K_p [f_{ak,i} + \eta'_d \gamma'_m (d + \sum_{j=1}^{i-1} z_j - 0.5) - \gamma'_m (d + \sum_{j=1}^{i-1} z_j)] + \gamma_m d = f'_{ak,i} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (13)$$

由方程求得 $f'_{ak,i}$ 为:

$$f'_{ak,i} = [\gamma_m d - \eta_b \gamma (b - 3) - \eta_d \gamma_m (d - 0.5)] + K_p [f_{ak,i} + \eta'_d \gamma'_m (d + \sum_{j=1}^{i-1} z_j - 0.5) - \gamma'_m (d + \sum_{j=1}^{i-1} z_j)] \quad (14)$$

式(14)的意义在于将下卧层 i 的承载力特征值反算到持力层位置, 得到能承担相同基底压力的持力层承载力虚拟特征值。所以, $f'_{ak,i}$ 可理解为下卧层 i 在持力层位置的等效承载力特征值。

所有土层的承载力特征值都被等效在持力层位置, 这样就可以方便比较。显然, 承载力特征值(或等效承载力特征值)最小的土层就是最危险土层, 即最先达到极限状态, 整个地基的承载性状以最危险土层来控制。因此, 天然地基的承载力特征值 f_{ak} 可按式计算:

$$f_{ak} = \min \{f_{ak,1}, f'_{ak,2}, \dots, f'_{ak,i}, \dots, f'_{ak,n}\} \quad (15)$$

式中: n ——附加压力主要分布范围的土层数。

考虑成桩工艺的影响, 处理后桩间土承载力特征值 f_{sk} 比天然地基承载力特征值 f_{ak} 提高了 k 倍, 因此 f_{sk} 为:

$$f_{sk} = k f_{ak} \quad (16)$$

式中, 系数 k 通常取 1.0 ~ 1.5, 不同桩型、不同成

桩工艺、不同地基土的情况 k 取值不同,详见《建筑地基处理技术规范》^[3] 的规定。

2 复合地基的承载力

前面已说明复合地基承载力特征值 f_{spk} 估算公式,见式(1)。因为复合地基也属于地基的范畴,参考《建筑地基基础设计规范》^[4],当基础有一定宽度和埋深时,复合地基承载力特征值应进行修正。

规范^[3]中复合地基承载力特征值的深度修正公式为:

$$f_{\text{spa}} = f_{\text{spk}} + \gamma_m (d - 0.5) \quad (17)$$

显然,如果复合地基处置范围内为淤泥等软弱土层,公式(17)是合理的。如果复合地基处置范围内的土层非软弱土层,参考规范^[4]中地基承载力特征值修正公式,复合地基承载力修正值 f_{spa} 宜按下式计算:

表 2 各土层的物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of different soil layers

序号	土层名	土层埋深/m	天然重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa	承载力特征值 f_{ak}/kPa
①	杂填土	0.0~0.8	18.0	9.8	1.19	5.34	80
②	黏土	0.8~3.1	18.4	37.3	1.06	7.82	100
③	淤泥	3.1~7.2	16.6	58.2	1.64	2.60	61
④	淤泥质黏土	7.2~15.0	17.8	45.1	1.25	3.04	69
⑤	粉土	15.0~19.5	19.9	26.0	0.72	10.75	140

淤泥层为基底下第二层土,故 $i=2$,由表 1 插值得扩散角 $\theta_1=16.2^\circ$,则基底压力扩散宽度和扩散系数为:

$$\Delta_{i-1} = 2 \sum_{j=1}^{i-1} (z_j \tan \theta_j) = 2 \times 1.6 \times \tan 16.2^\circ \approx 0.93 \text{ m}$$

$$K_p = \frac{(b + \Delta_{i-1})(l + \Delta_{i-1})}{bl} = \frac{4.93 \times 5.93}{20} \approx 1.462$$

按式(14)计算淤泥层的等效承载力特征值为:

$$f'_{\text{ak},2} = K_p [f_{\text{ak},2} + \eta'_d \gamma'_m (d + z_1 - 0.5) - \gamma'_m (d + z_1)] + [\gamma_m d - \eta_b \gamma (b - 3) - \eta_d \gamma_m (d - 0.5)] \approx 84.9 \text{ kPa}$$

其中, $\eta_b = 0$, $\eta_d = 1$, $\eta'_d = 1$, $\gamma = 18.4 \text{ kN/m}^3$, $\gamma'_m \approx 18.3 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_m \approx 18.2 \text{ kN/m}^3$ 。

同理,计算出其他各土层的等效承载力特征值(表 3)。由表 3 可知,淤泥层的等效承载力特征值最小,可以判定淤泥层为最危险土层。

表 3 各土层的等效承载力特征值

Table 3 Equivalent characteristic values of the bearing capacity in different soil layers

土层	②黏土	③淤泥	④淤泥质黏土	⑤粉土
等效承载力特征值 (或承载力特征值)/kPa	100	84.9	101.5	308.5

$$f_{\text{spa}} = f_{\text{spk}} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (18)$$

式中,承载力修正系数 η_b, η_d 按基底下土的类别可由文献[4]表 5.2.4 取值,其他符号同前。式(18)将通过算例 2 来验证说明。

3 算例分析

3.1 算例 1

某建筑工程柱下扩大基础,基础边长 $5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,基础埋深 1.5 m ,土层主要指标如表 2 所示,粉土的黏粒含量大于 10% 。为保证地基承载力和沉降满足工程要求,拟采用 CFG 桩复合地基进行加固处理,桩端进入粉土层 0.5 m ,建筑场地地下水位埋深约 3.1 m 。

基底持力层为黏土,桩间土附加压力主要分布在土层②③④⑤。下面以淤泥层为例,计算其等效承载力特征值。

分析表 3 发现,除持力层外,各下卧土层的等效承载力特征值比表 2 的承载力特征值均有不同程度增大;且土层埋深越大,等效承载力增加越多。这是因为上层土的应力扩散作用,下卧层埋深越大,其受到的基底附加应力越小。

假定 CFG 桩采用非挤土成桩工艺, k 取 1.0 ,由式(15)、(16)得到桩间土承载力特征值 $f_{\text{sk}} = 84.9 \text{ kPa}$ 。

为了对比分析,按前面三种经验法分别求出桩间土承载力特征值 f_{sk} ,结果如表 4 所示。从表 4 的结果来看,方法一计算值最大,方法二计算值最小,本文方法与方法三计算值相近。

表 4 各方法计算的 f_{sk} 值和 f_{spa} 值

Table 4 Values of f_{sk} and f_{spa} calculated with different methods

计算方法	方法一 $f_{\text{sk}} =$ $f_{\text{ak,持力层}}$	方法二 $f_{\text{sk}} =$ $\min \{f_{\text{ak},i}\}$	方法三 $f_{\text{sk}} =$ $\frac{\sum (f_{\text{ak},i} \times h_i)}{\sum h_i}$	本文方法
	f_{sk}/kPa	f_{sk}/kPa	f_{sk}/kPa	
	100	61	87.7	84.9
	118.2	79.2	105.9	103.1

到底 f_{sk} 取哪个值更合理? 做如下讨论:假设 CFG

桩的置换率 $m=0$, 由式(1)求得复合地基承载力特征值 $f_{\text{spk}} = \beta f_{\text{sk}}$, 令 $\beta=1$, 按式(18)计算复合地基承载力修正值 f_{spa} , 当 $f_{\text{sk}}=100$ kPa 时有:

$$f_{\text{spa}} = 100 + 18.2 \times (1.5 - 0.5) = 118.2 \text{ kPa}$$

其中, $\eta_b = 0$, $\gamma = 18.4 \text{ kN/m}^3$, $\eta_d = 1$, $\gamma_m \approx 18.2 \text{ kN/m}^3$, 同理, 计算出 f_{sk} 取其他值时复合地基承载力修正值 f_{spa} , 结果见表 4。

同时, 按《建筑地基基础设计规范》验算软弱下卧层, 过程如下:

淤泥层顶面处土的自重压力值:

$$p_{\text{cz}} = 18 \times 0.8 + 18.4 \times 2.3 = 56.72 \text{ kPa}$$

淤泥层经深度修正后承载力特征值:

$$f_{\text{az}} = 61 + 1 \times \frac{56.72}{3.1} \times (3.1 - 0.5) \approx 108.57 \text{ kPa}$$

淤泥层顶面处附加压力值:

$$p_z = \frac{(p_k - p_c)bl}{(b + 2z_1 \tan \theta_1)(l + 2z_1 \tan \theta_1)} \\ = \frac{20(p_k - 27.28)}{4.93 \times 5.93}$$

其中, $p_c = 18 \times 0.8 + 18.4 \times 0.7 = 27.28 \text{ kPa}$,

$$2z_1 \tan \theta_1 = 2 \times 1.6 \times \tan 16.2^\circ = 0.93 \text{ m}$$

代入规范^[4]公式 $p_z + p_{\text{cz}} \leq f_{\text{az}}$, 计算淤泥层所能承受的最大基底压力:

$$p_k \approx 103.07 \text{ kPa}$$

同理, 验算淤泥质黏土层所能承受的最大基底压力:

$$p'_k \approx 119.63 \text{ kPa}$$

因此, 地基所能承受的最大基底压力应为 103.07 kPa。

综合比较, 本文方法计算的 $f_{\text{spa}} = 103.10 \text{ kPa}$, 确定最危险土层为淤泥层, 与《建筑地基基础设计规范》对软弱下卧层验算得到的最大基底压力值 (103.07 kPa) 非常接近, 仅相差 0.03 kPa, 说明本文方法求解的 f_{sk} 值是较精确的。

3.2 算例 2

某工程项目为框架剪力墙结构^[6], 筏板基础, 基础埋深 8.5 m, 地上 25 层, 地下 3 层。建筑场地工程地质情况如表 5 所示。拟建建筑物基础位于第四层黏土层上, 持力层的承载力特征值为 $f_{\text{ak}} = 170 \text{ kPa}$, 基底压力设计值为 $p = 450 \text{ kPa}$ 。经计算, 基础底面以上土的加权平均重度 $\gamma_m = 18.9 \text{ kN/m}^3$, 基础底面持力层土的重度 $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$, 承载力修正系数 $\eta_b = 0.3$, $\eta_d = 1.6$, 根据《建筑地基基础设计规范》计算天然地基经深宽修正后的承载力特征值为:

表 5 工程地质概况

Table 5 General condition of engineering geology

土层 编号	土层 名称	厚度 h/m	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	承载力特征值 f_{ak}/kPa
①	杂填土	1.6	18.0		120
②	粉土	2.6	18.6	10.5	130
③	粉质黏土	1.9	19.2	9.3	160
④	黏土	5.4	19.5	7.5	170
⑤	粉土	8.7	19.8	16.2	150
⑥	粉细砂	9.8	21.0	18.0	180

$$f_a = f_{\text{ak}} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ = 170 + 0.3 \times 19.5 \times 3 + 1.6 \times 18.9 \times (8.5 - 0.5) \\ = 429.47 \text{ kPa} < 450 \text{ kPa}$$

由于天然地基不能满足地基承载力设计要求, 采用 CFG 桩对地基进行处理。初步设计 CFG 桩各参数为: 桩径 400 mm, 桩长 9 m, 单桩承载力 $R_a = 500 \text{ kN}$, 单桩承载力发挥系数 $\lambda = 0.9$, 面积置换率 $m = 0.0313$, 桩间土承载力发挥系数 $\beta = 0.9$, 忽略成桩的振动和挤土效应, 取 $k=1$ 。现估算 CFG 桩复合地基承载力情况。

根据前面计算经验, 第⑤层粉土是最危险土层, 桩间土承载力特征值 $f_{\text{sk}} = f'_{\text{ak},2}$, 有:

$$f'_{\text{ak},2} = K[f_{\text{ak},2} + \eta'_d \gamma'_m (d + z_1 - 0.5) - \gamma'_m (d + z_1)] \\ + [\gamma_m d - \eta_b \gamma (b - 3) - \eta_d \gamma_m (d - 0.5)] \\ = [150 + 1.5 \times 19.0 \times 11 - 19.0 \times 11.5] \\ + [18.9 \times 8.5 - 0.3 \times 19.5 \times (6 - 3) \\ - 1.6 \times 18.9 \times 8] = 146.18 \text{ kPa}$$

其中, $\theta_1 = 0$, $\Delta_{i-1} = 2z_1 \tan \theta_1 = 0$ m, $\eta'_d = 1.5$, $\gamma'_m \approx 19.0 \text{ kN/m}^3$, $K = \frac{(b + \Delta_{i-1})(l + \Delta_{i-1})}{bl} = 1$, 其他符号同前。

3 种经验法分别求得的 f_{sk} 结果见表 6。

表 6 不同方法求得的 f_{sk} 值

Table 6 Values of f_{sk} calculated with different methods

计算方法	方法一 $f_{\text{sk}} = f_{\text{ak,持力层}}$	方法二 $f_{\text{sk}} = \min \{f_{\text{ak},i}\}$	方法三 $f_{\text{sk}} = \frac{\sum (f_{\text{ak},i} \times h_i)}{\sum h_i}$	
			本文方法	
f_{sk}/kPa	170	150	166.47	146.18

若桩间土承载力特征值 $f_{\text{sk}} = 146.18 \text{ kPa}$, 按规范 [3] 计算, 复合地基承载力特征值为:

$$f_{\text{spk}} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta (1 - m) f_{\text{sk}} = \frac{0.9 \times 0.0313 \times 500}{3.14 \times 0.2^2} \\ + 0.9 \times (1 - 0.0313) \times 146.18 \approx 239.59 \text{ kPa}$$

复合地基承载力修正值为:

$$f_{\text{spa}} = f_{\text{spk}} + \gamma_m (d - 0.5) = 239.59 + 18.9 \times (8.5 - 0.5) = 390.79 \text{ kPa}$$

按文献 [6] 公式计算, 复合地基承载力修正值为:

$$f_{spa} = \frac{\lambda m R_a}{A_p} + \beta(1 - m)[f_{sk} + \eta_b \gamma(b - 3) + \eta_d \gamma_m(d - 0.5)]$$

$$= \frac{0.9 \times 0.0313 \times 500}{3.14 \times 0.2^2} + 0.9 \times (1 - 0.0313) \times [146.18 + 0.3 \times 19.5 \times 3 + 1.6 \times 18.9 \times (8.5 - 0.5)] \approx 465.80 \text{ kPa}$$

按本文公式(18)计算,复合地基承载力特征值为:

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk}$$

$$= \frac{0.9 \times 0.0313 \times 500}{3.14 \times 0.2^2} + 0.9 \times (1 - 0.0313) \times 146.18 \approx 239.59 \text{ kPa}$$

复合地基承载力修正值为:

$$f_{spa} = f_{spk} + \eta_b \gamma(b - 3) + \eta_d \gamma_m(d - 0.5)$$

$$= 239.59 + 0.3 \times 19.5 \times 3 + 1.6 \times 18.9 \times (8.5 - 0.5) = 499.06 \text{ kPa}$$

桩间土承载力特征值 f_{sk} 其他取值时,复合地基承载力计算结果见表7所示。

表7 复合地基承载力 f_{spa} 计算结果(单位:kPa)

Table 7 Calculation results for f_{spa}

f_{sk}/kPa	规范[3]公式	文献[6]公式	本文公式(18)
170	411.55	486.57	519.82
150	394.12	469.13	502.39
166.47	408.48	483.49	516.75
146.18	390.79	465.80	499.06

从表7可以看出,规范[3]计算的复合地基承载力最大值为411.55 kPa,而天然地基承载力修正值为429.47 kPa,复合地基加固后的承载力值小于天然地基承载力值,这不太合理。

文献[6]与本文公式(18)计算结果相近,如 $f_{sk} = 146.18 \text{ kPa}$ 时,文献[6]为465.80 kPa,本文公式结果为499.06 kPa。分析可知,文献[6]仅考虑桩间土的承载力修正,本文公式是对整个复合地基的承载力修正。显然,复合地基处于一定尺寸和埋深的基底时,桩间土的承载力特征值是需要进行深宽修正的,同时,桩侧阻力和桩端阻力均由桩周土所提供,所以桩的承载力特征值同样会因基础的深宽因素而发生变化。因此,复合地基中桩和桩间土的承载力都宜考虑深宽修正。

虽然本文公式(18)在理论上更合理,计算结果也符合算例的设计要求,但毕竟公式求出的只是估算值,复合地基承载力特征值应通过复合地基静载荷试验等现场试验方法进行确定。

4 结论

(1)基于国家标准规范的压力扩散原理,通过理

论推导,本文得出了复合地基中桩间土承载力特征值 f_{sk} 的估算公式。

(2)论文进一步探讨了复合地基的承载力问题,并通过算例的对比分析,验证了本文公式更合理、可靠。

(3)本文公式比现有经验法在理论上更加严密,且仅适用于建筑工程,路桥工程因所用规范不同将另作讨论。

(4)本文方法虽然不能解析 f_{sk} 的真实大小,但作为估算方法,能方便广大工程设计人员参考、使用。

参考文献:

- [1] 佟建兴,闫明礼,胡志坚,等. CFG桩复合地基承载力的确定[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 87-91. [TONG J X, YAN M L, HU Z J, et al. CFG pile composite foundation bearing capacity to determine [J]. Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 87-91. (in Chinese)]
- [2] 郑刚,顾晓鲁,姜忻良. 水泥搅拌桩复合地基承载力辨析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 487-489. [ZHENG G, GU X L, JIANG X L. Discussion on the bearing capacity of cement treated composite foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 487-489. (in Chinese)]
- [3] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [JGJ79—2012 Technical code for ground treatment of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)]
- [4] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. [GB 50007—2011 Code for design of building foundation [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)]
- [5] 张高峰. 验算软弱下卧层强度时应注意的问题[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(4): 199-201. [ZHANG G F. Advertent Problems in the Strength Checking Computation of Soft Substratum [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(4): 199-201. (in Chinese)]
- [6] 张钦喜,王晓杰,陶韬. CFG桩复合地基承载力计算新公式研究[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(3): 122-162. [ZHANG Q X, WANG X J, TAO T. Research on Foundation Bearing Capacity Calculation Methods of CFG-Pile Composite Foundation [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2015, 29(3): 122-162. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞