

关于桩基软弱下卧层验算的几点认识

李广信¹ 张在明^{2,3}

(1. 清华大学土木水利学院, 北京 100084; 2 北京市勘察设计研究院, 北京 100038;
3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022)

【摘要】 对于国内外不同的规范、手册中对于桩基软弱下卧层验算的不同方法进行了分析。提出以下的一些建议: 承台底面以上的原地基土自重及附加应力计算时可以扣除, 在总应力计算时再加上; 扣除的群桩实体基础四周的摩阻力应使用群桩四周地基土的摩阻力特征值, 而不是极限值; 对于地下室中的独立柱的桩基础和内墙的条形桩基础, 应当从地下室地面而不是原地面起算进行验算。

【关键词】 桩基; 软弱下卧层; 自重应力; 摩阻力

【中图分类号】 TU 473.12

Suggestions on Checking Computation of Underlying Stratum With Soft Soil in Pile Foundation

Li Guangxin¹ Zhang Zaiming²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;
2. Beijing Geotechnical Institute, Beijing 100038;
3. College of Architecture Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022 China)

【Abstract】 The different methods of checking computation of underlying weak layer in pile foundation which are suggested in different codes or handbooks are analyzed. Some suggestions are proposed; the self-weight stress of soil which is between the base of cap and ground surface are added in or subtracted from separately in different stress calculations the shaft friction around the pile group which is deducted in computation of additional stress is the characteristic value rather than limit value, and the checking computation is carried out from ground surface of basement in the case of strip footing and individual footing in basement.

【Key Words】 pile foundation; underlying weak layer; self-weight stress; friction resistance

0 引言

当桩基下有软弱下卧层时, 应当进行承载力的验算, 在不同的规范和手册中规定和建议的方法有很大不同, 计算的结果差别很大。这表明在这一课题的理论研究和实际测试还很不够。过大的安全储备会造成浪费, 而不合理的计算可能会发生安全问题。本文对不同的规范和文献中的计算方法进行了分析, 提出一些建议, 一方面希望使计算更合理, 另一方面, 也使其概念更加清楚, 为设计计算提供参考。

1 关于承台以上地基土的自重

1.1 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)^[1]

在这个规范的式(5.2.13-1)和(5.2.13-2)中, 规定:

$$\sigma_z + \gamma_z \leq q_{uk}^w / \gamma_q \quad (5.2.13-1)$$

$$\sigma_z = \frac{\gamma_0(F+G) - 2(A_0+B_0) \cdot \sum q_{sik} l_i}{(A_0+2t \cdot \tan\theta)(B_0+2t \cdot \tan\theta)} \quad (5.2.13-2)$$

式中: σ_z ——作用于软弱下卧层顶面的附加应力, kPa;
 F ——作用于桩基承台顶面的竖向力设计值, kN;
 G ——桩基承台和承台上土自重设计值, kN;
 γ_i ——软弱下卧层顶面以上各土层重度(地下水以下取浮重度)按土层厚度计算的加权平均值, kN/m³;
 z ——地面至软弱层顶面的深度, m;
 q_{uk}^w ——软弱下卧层经深度修正的地基承载力标准值, kPa;
 q_{sik} ——群桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值, kPa;
 A_0, B_0 ——桩群外缘矩形面积的长、短边长, m;
 θ ——桩端硬持力层压力扩散角, (°)。

注意这个计算公式,可以发现如下几个特点:

1) 式(5.2.13-2)中分子,亦即桩端平面的附加压力计算中没有扣除承台底面以上地基土的自重 γhA (γ 为承台底面以上各土层重度加权平均值, A 为承台面积, h 为承台高度),使附加压力计算值偏大;而在式(5.2.13-1)中计算总应力时则包括了承台底面以上地基土的自重;

2) 它也没有计及在桩长范围内地基土自重的增加,例如桩身混凝土重度比地基土高,另外在预制桩、夯扩桩等情况对原地基土有加密加重作用;

由于后者很难准确计算,因而这样计算也还能接受。从理论上讲,似乎一般情况下偏于安全(保守)。

1.2 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—修订送审稿)^①

在上一个规范的修订稿中,对这一计算进行了修改,其中(5.4.1)条规定:对于桩距不超过 $6d$ 且桩长小于 $15m$ 群桩基础,桩端持力层下存在承载力低于桩端持力层承载力 $1/3$ 的软弱下卧层时,应按下式验算软弱下卧层的承载力:

$$\sigma_z + \gamma_m(l+t) \leq f_{az} \quad (5.4.1-1)$$

$$\sigma_z = \frac{(F_k + G_k) - 2(A_0 + B_0) \cdot \sum q_{sik} l_i}{(A_0 + 2t \cdot \tan\theta)(B_0 + 2t \cdot \tan\theta)} \quad (5.4.1-2)$$

式中: γ_m ——软弱下卧层顶面以上各土层重度(地下水以下取浮重度)按土层厚度计算的加权平均值, kN/m^3 ;

l ——桩长, m ;

t ——坚硬持力层厚度, m ;

f_{az} ——经深度修正后软弱下卧层承载力的特征值, kPa 。

1) 与94版规范一样,在(5.4.1-2)式的分子中没有减去 γhA ,但是在上式的总应力计算中,自重计算深度只包括桩长和坚硬持力层厚度,也没有考虑承台底面以上的土的自重 γh ,似乎二者抵消;而在94版规范中,上式的计算深度 z 是“地面至软弱层顶面的深度”。

2) 但是这其中落实到软弱下卧层顶面的总应力有一个差值,即少计算了软弱层顶面的总应力:

$$\Delta\sigma = \gamma h \left[1 - \frac{ab}{(A_0 + 2t \tan\theta)(B_0 + 2t \tan\theta)} \right], \quad a, b \text{ 为承台尺寸。只是在扩散角 } \theta = 0^\circ \text{ 时,减少的应力}$$

与增加的应力才接近 ($A_0 \approx a, B_0 \approx b$) 相等。在一般情况下,由于应力计算中加少减多,少计算了软弱下卧层顶面(荷载)总应力;严格讲,这是偏于危险的,尤其对于小尺寸承台桩基;

1.3 美国的《基础工程手册》(Foundation Engineering Handbook)^[4]

该手册建议的计算公式为:

$$p_1 \leq \sigma_{a1} \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{\sum P + G}{AB} \quad (2)$$

其中, $A = a + 2t \times \tan\alpha, B = b + 2t \times \tan\alpha, a, b$ 为承台的长度和宽度, $\sum P$ 为作用于承台顶面上的总竖向力。可见

1) 荷载项(式(2)分子项)没有扣除承台以上地基土重力 γhA ;

2) 在软弱下卧层顶面处,总应力没有包括从地面到软土顶部土的全部自重应力 γz ;

3) α_{a1} , 为软土地基容许承载力,从原书的前面(该手册三章)介绍它是载荷试验确定的容许承载力,亦即不加深度、宽度修正项。这与计算应力中不计从地面到软土顶部分土的自重,二者抵消,亦即承载力及荷载都不计土的自重部分,因为深度修正系数不小于 1.0 ,亦即 $\eta_d \geq 1.0$ 。这是偏于安全的,即荷载部分减少的数值少,承载力部分减少的数值多一些;而在计算附加应力时,没有扣除 γhA 部分,所以进一步增加了安全度。

可见,与我国的有关规范比较,美国的《基础工程手册》在计算考虑土的自重应力部分是偏于安全(保守)的。

2 关于群桩实体基础外围侧阻力的计算

从上述各公式中,可以发现对于群桩实体深基础四周摩阻力的考虑也各不相同。在《建筑桩基技术规范》94年版和修订稿中,计算附加应力时,扣除了实体基础外表面总极限摩阻力。而美国的《基础工程手册》在计算附加应力时,没有扣除群桩实体基础外侧摩阻力,荷载也没有从承台底部扩散;全部荷载都产生附加应力,这显然偏于安全。

在《建筑桩基技术规范》修订稿的条文说明中,指出“按扣除了实体基础外表面总极限摩阻力,而非 $1/2$ 总极限摩阻力。这是主要考虑荷载传递机理,在软弱下卧层进入临界状态前,桩基侧阻已达到极限。”

^① 中华人民共和国行业标准. JGJ 94—建筑桩基技术规范[S] (修订送审稿).

条文说明那样解释似乎也有道理,但是作为规范,也应当实行“谁主张,谁举证”。应当有充分的实际工程测试资料。我们认为这种主张的证据不足。很极端的一个例子,如果是对于小尺寸的摩擦型桩,可能会发生群桩四周的极限总摩阻力大于附加的荷载效应的情况。例如一个 3×3 的9桩独立桩基,桩距为 $4d$,如设计总承载力 60% 为基桩的摩阻力,则总承载力为: $9\pi d \sum q_{sik} l_i / 0.6 = 47.1 d \sum q_{sik} l_i$ 亦即 $F_k + G_k \leq 47.1 d \sum q_{sik} l_i$ 。而根据规范修订稿的式(5.4.1-2)按极限摩阻力计算得到: $A_0 = B_0 = 9d$,扣除的总摩阻力为: $2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i = 36d \times 2 \sum q_{sik} l_i = 72d \sum q_{sik} l_i > F_k + G_{ki}$,亦即,在计算范围中,附加应力为零(见图1)。这显然于理不通,这种在计算基桩承载力时用摩阻力特征值,在计算群桩摩阻力时用极限值的做法也不好理解。

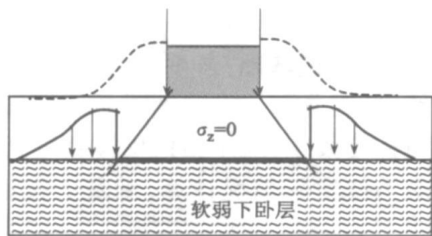


图1 按照公式(5.4.1-2)计算的软弱下卧层上附加压力分布

而实际上根据静力平衡,所有的上部附加荷载必须由软弱下卧层承担,不可能出现图1表示的情况,即使附加荷载全部由摩阻力承担,群桩底部应力为零,其附加应力分布大体上见图2。

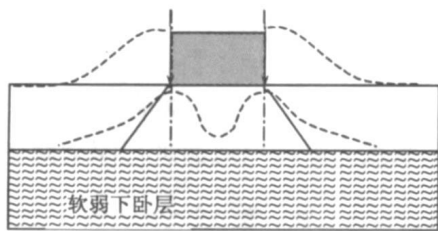


图2 实际压力分布示意图

有趣的是根据美国《基础工程手册》的计算,其软弱下卧层顶面的附加应力分布见图3,亦即附加的荷载($\sum P + G$)完全作用在扩散的范围之内,不扣除摩阻力。

无疑,这两种计算都有些极端。实际上既不可能群桩实体基础四周的摩阻力承担了所有荷载,也不可

能摩阻力一点也不承担。大部分情况见图4。可见:

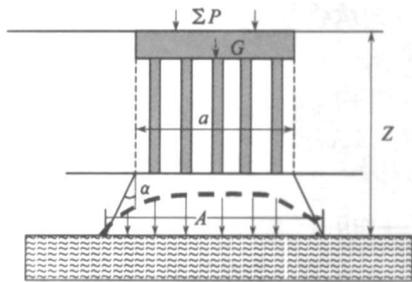


图3 美国基础工程手册的软弱下卧层验算示意图

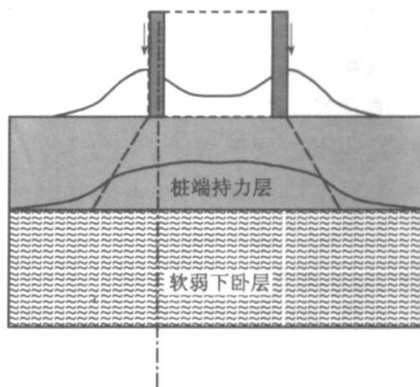


图4 各层土面上的实际附加应力分布示意图

1) 在软弱下卧层顶面的 $(A_0 + 2t \tan \theta)(B_0 + 2t \tan \theta)$ 的范围内,不止只作用 $(F_k + G_k) - 2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i$ 的总附加压力, $2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i$ 部分也会扩散到这个范围;

2) 软弱下卧层顶面上的附加应力是不规则的非线性分布,无法准确地界定作用范围,因而不进行承载力的宽度修正是合理的;

3) 由于桩土的相互作用,侧阻力 $2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i$ 一部分要扩散到 $(A_0 + B_0)$ 范围之内,一部分作用在其外。作用在 $(A_0 + B_0)$ 范围之外的应力,成为考虑的软弱下卧层荷载范围外的旁侧压力,实际上等于增加了深度修正项的超载 γ_z ,有利于提高软土承载力,如果有利与不利的影 响都不考虑,亦即目前的计算方法是既不计范围内荷载的增加,也不计范围外承载力的增加,姑妄而用之的,无法细究,大体合理。

3 北京规范修订稿(草案)

在最近修订的《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》(DBJ01-501-1)^①中,规定当桩端平面以

① 中华人民共和国行业标准. DBJ 01-501-1 北京地区建筑地基基础勘察设计规范[S](征求意见稿).

下受力层范围内存在软弱下卧层时,应按下列式验算软弱下卧层的承载力:

$$\sigma_z + \gamma_i (h + l + t) \leq f_a \quad (9.2.8-1)$$

$$\sigma_z = \frac{(F_k + G_k) - \gamma_m h A - 2(A_0 + B_0) \sum q_{si} l_i}{(A_0 + 2t \cdot \tan \theta)(B_0 + 2t \cdot \tan \theta)} \quad (9.2.8-2)$$

式中: σ_z ——作用于软弱下卧层顶面的附加应力, kPa;
 F_k ——荷载效应标准组合下, 作用于承台顶面的竖向力, kN;
 G_k ——桩基承台和承台上土自重标准值, kN;
 γ_m ——承台底面以上各土层重度(地下水以下取浮重度)按土层厚度计算的加权平均值, kN/m³;
 γ_i ——软弱下卧层顶面以上各土层重度(地下水以下取浮重度)按土层厚度计算的加权平均值, kN/m³;
 h ——承台埋深, m;
 l ——桩长, m;
 t ——坚硬持力层厚度, m;
 f_a ——软弱下卧层经深度修正的地基承载力标准值, kPa;
 A_0, B_0 ——群桩外缘矩形面积的长、短边长, m;
 θ ——桩端硬持力层压力扩散角, (°);
 A ——承台的面积, m²;
 q_{si} ——群桩四周第 i 层土单位摩阻力的标准值, kPa。

其中承台上地基土自重, 在计算附加应力时扣除, 在计算软弱下卧层顶面的总应力时又加上, 概念比较清楚; 扣除的群桩外缘摩阻力 q_{si} 按标准值计算(极限值的 1/2)。结合以上的讨论, 这样规定大体上合理。

4 有地下室的情况

在有地下室的柱下单独桩基础、内墙条形桩基础、大型筏板桩基础的软弱下卧层验算时, 存在附加应力、自重应力和深度修正如何选取的问题。根据《桩基规范》(见图 5), 对于地下室内的独立基础和条形基础, 可见计算桩底的压力时(式(5.1.14-2)的分子部分), 在 G 的计算中如果包括了 d_2 部分, 而并没有扣除 γd_2 的自重, 在计算总应力时(式(5.1.14-1))又多加了 γd_2 的部分, 两种情况叠加, 计算

的扩散应力 σ_z 被明显高估了(当成实体的地下部分), 软弱下卧层承载力的验算就太保守了。但软弱下卧层承载力按原地面修正, 则又偏于危险。

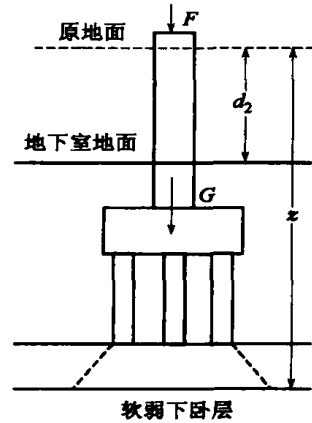


图 5 地下室的独立桩基和内墙桩基的软弱下卧层承载力验算

合理的计算应当是, 对于地下室中的单桩、单独桩基础、内墙条形桩基础, 自重应力各项均应按地下室地面计算, 同时软弱下卧层的承载力, 可以按地下室地面进行深度修正; 对于整体桩筏基础, 软弱下卧层顶面的应力按实际情况计算, 承载力按原地面进行深度修正。

5 结论

- 1) 在进行桩基的软弱下卧层验算时, 承台以上地基土的自重, 在计算附加应力时扣除, 在计算总应力时再加入, 这样概念较为清楚。
- 2) 计算中扣除的群桩实体基础四周的摩阻力, 应按单位摩阻力的特征值(或标准值), 不应按极限值计算。
- 3) 在有地下室的情况, 对于单桩、单独桩基础、条形桩基础, 验算中软弱下卧层顶面的应力和承载力应从地下室地面起算, 桩筏基础情况, 应力按实际情况计算, 承载力可按原地面进行深度修正。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国行业标准. JGJ 94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] Hans F, Winterkorn, Hsai-Yang Fang. Foundation Engineering Handbook[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1975.

收稿日期: 2007-04-10