

# 桩基软弱下卧层承载力验算方法分析

雷丰浩<sup>1</sup> 田敬贤<sup>2</sup> 王成华<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 河北工业大学校园规划处, 天津 300401)

**【摘要】** 桩基软弱下卧层承载力验算是桩基础设计的重要内容之一, 对《建筑桩基技术规范》JGJ 94—94 及 JGJ 94—2008 中关于桩基软弱下卧层承载力验算方法进行了对比分析。考虑了承台上土自重以及群桩实体基础侧摩阻力取值对验算结果的影响, 认为两版规范中关于软弱下卧层顶面附加应力的计算均有不当之处。提出了以下建议: 前者较适合于没有地下室的柱下群桩基础, 后者则较适用于有地下室的桩-箱(筏)基础; 计算附加应力时所扣除的群桩实体基础的侧摩阻力应取特征值。

**【关键词】** 桩基础; 软弱下卧层; 承载力; 自重应力; 侧摩阻力

**【中图分类号】** TU 431

**【文献标识码】** A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2013. 01. 001

## Analysis of Methods for Checking Bearing Capacity of Underlying Weak Layer in Pile Foundation Design

Lei Fenghao<sup>1</sup> Tian Jingxian<sup>2</sup> Wang Chenghua<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Campus Planning, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**【Abstract】** Checking for the bearing capacity of underlying weak layer is an important item in pile foundation design. The different methods which are suggested in Technical Code for Building Pile Foundations JGJ 94—1994 and JGJ 94—2008 are comparatively analyzed. The self weight of soil above cap and the shaft resistance around the pile group are analyzed. Deficiencies of the methods are found in the two codes, some suggestions are put forward; the former is fit for small-scale pile foundation without basement while the latter is fit for piled box(raft) foundation with basement, the shaft resistance around the pile group should use the characteristic value when calculate the additional stress.

**【Key words】** pile foundation; underlying weak layer; bearing capacity; self-weight stress; shaft resistance

### 0 引言

地基中, 下卧层是指位于持力层以下并处于压缩层范围内的土层; 持力层是指直接承受结构荷载的地层; 压缩层是指在建筑物基础荷载下, 地基土中产生绝大部分沉降量的土层的总和; 而软弱下卧层则是指承载力显著低于持力层的高压缩性土层。

软弱下卧层通常具备下述特点: 天然含水量高、天然孔隙比大、压缩性高、承载力低、抗剪强度低、渗透性低。因此, 我国规范规定, 当地基受力层范围内有承载力较低的软弱下卧层时, 应对软弱下卧层的承载力进行验算。对于浅基础, 由于其传力机理比较简单, 软弱下卧层顶面的附加应力与自重应力都比较容易确定, 因此其软弱下卧层的承载力验算相对容易; 而对于桩基础, 其传力方式及工作机理比较复杂, 又由于桩基础的类型、承台上土的自重以及桩

侧摩阻力的发挥等复杂问题, 所以桩基础的软弱下卧层承载力验算问题相对复杂。

桩基软弱下卧层承载力验算是桩基础设计的重要内容之一。本文主要针对桩基础软弱下卧层的承载力验算问题对《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)<sup>[1]</sup> 以及《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[2]</sup> (以下简称 94 规范及 08 规范) 进行了对比分析, 提出了一些建议, 使验算更为合理。

### 1 承台上土自重的影响

#### 1.1 94 规范中关于附加应力与总应力的计算

94 规范中规定对于桩距  $S_n \leq 6d$  的群桩基础, 其软弱下卧层顶面附加应力按式(1)计算(见图 1)<sup>[1]</sup>:

$$\sigma_z = \frac{\gamma_0(F + G) - 2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i}{AB} \quad (1)$$

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50978182)

**作者简介:** 雷丰浩, 1989 年生, 男, 汉族, 河南洛阳人, 硕士研究生。研究方向: 深基础。E-mail: leifh1989@163.com

式中： $\gamma_0$ 为建筑桩基重要性系数； $F$ 为作用于承台顶面的竖向力设计值； $G$ 为桩基承台和承台上土自重设计值； $A_0$ 、 $B_0$ 分别为桩群外缘矩形底面的长、短边边长； $l_i$ 为桩穿越第*i*层土的厚度； $A=A_0+2t\tan\theta$ ， $B=B_0+2t\tan\theta$ ； $t$ 为持力层厚度； $\theta$ 为桩端硬持力层压力扩散角(见表1)； $q_{sik}$ 为桩周第*i*层土的极限侧阻力标准值； $\sigma_z$ 为对应荷载设计值的作用于软弱下卧层顶面的附加应力。

软弱下卧层顶面总应力按式(2)计算：

$$\sigma^* = \sigma_z + \gamma_m(l+t+h) \quad (2)$$

式中： $l$ 为桩长； $t$ 为硬持力层厚度； $h$ 为地面至承台底面的深度； $\gamma_m$ 为软弱层顶面以上各土层重度(地下水水位以下取浮重度)的厚度加权平均值。

由式(1)及式(2)可见，附加应力的计算中包含了承台上土的自重，而总应力的计算中自重应力一项也包含了承台上土的自重。对于含有地下室的桩-箱(筏)基础，由于地下室范围内土体已挖除，若总应力按式(1)、式(2)计算，就过于保守。

表1 桩端硬持力层压力扩散角  $\theta$

$E_{s1}/E_{s2}$	压力扩散角 $\theta/(^\circ)$	
	$t=0.25B_0$	$t \geq 0.50B_0$
1	4	12
3	6	23
5	10	25
10	20	30

注：①  $E_{s1}$ 、 $E_{s2}$ 分别为硬持力层、软弱下卧层的压缩模量；

② 当  $t < 0.25B_0$  时，取  $\theta = 0^\circ$ ，必要时，宜通过试验确定；当  $0.25B_0 < t < 0.50B_0$  时，可内插取值

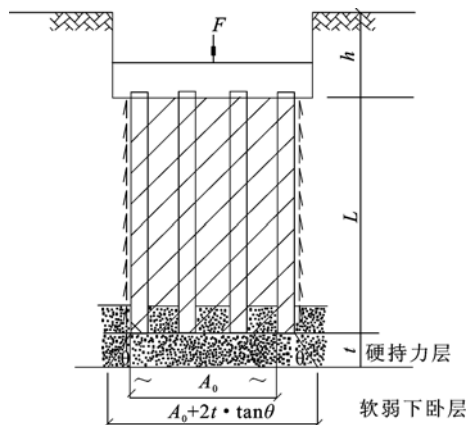


图1 桩距小于  $6d$  群桩软弱下卧层承载力验算

### 1.2 08规范中关于附加应力与总应力的计算

08规范中软弱下卧层顶面竖向附加应力按式(3)计算：

$$\sigma_z = \frac{(F_k + G_k) - \frac{3}{2}(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i}{AB} \quad (3)$$

式中： $F_k$ 为按荷载效应标准组合计算的作用于承台顶面的竖向力； $G_k$ 为桩基承台和承台上土自重标准值； $\sigma_z$ 为对应于荷载标准值的作用于软弱下卧层顶面的附加应力。

总应力按式(4)计算：

$$\sigma^* = \sigma_z + \gamma_m(l+t) \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可见，式(3)计算附加应力时没有扣除承台上土的自重，式(4)在总应力计算中的自重应力没有包含承台上土的自重。式(3)在附加应力的计算中将承台上土的自重考虑在内时，承台上土的自重就会向软弱下卧层顶面进行扩散，那么总应力的计算中就减少了式(5)所示的这部分应力<sup>[3-4]</sup>：

$$\Delta\sigma^* = \gamma_m h \left[ 1 - \frac{bl}{AB} \right] \quad (5)$$

式中： $b$ 、 $l$ 为矩形承台的宽度与长度。

可以看出，承台尺寸越小，持力层厚度越大，总应力就减少得越多，验算结果就越偏于危险。因此，对于承台尺寸较小的柱下独立基础、柱下条形基础或者墙下条形基础等，这种验算方法不太适合；而对于大尺寸承台的桩基，例如大型的桩筏(箱)基础，总应力的减少量  $\Delta\sigma^*$  较小。

假设某预制桩基础，矩形承台，承台尺寸  $3.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ，埋深  $3\text{ m}$ ，承台底面以上土的重度为  $19.6\text{ kN/m}^3$ ，持力层压力扩散角为  $16^\circ$ 。边桩外缘距承台边界的距离为  $0.3\text{ m}$ ，即  $A_0 = b - 0.3$ 、 $B_0 = b - 0.3$ 。通过具体计算来反映持力层厚度及承台尺寸对总应力减小的影响。

总应力的减少量随持力层厚度的变化情况图2。可见，随着持力层厚度的增加，总应力减少量随之增大，当持力层厚度增加到一定程度后，其对软弱下卧层顶面总应力减少量影响较小。

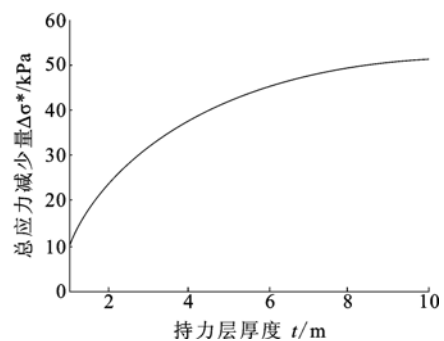


图2 持力层厚度对总应力的影响

假定持力层厚度为  $3\text{ m}$ ，承台尺寸对总应力减

少量  $\Delta\sigma^*$  的影响见图 3。

由图 3 可见,承台尺寸越小,总应力减少量就越大,承台尺寸增大到某一定值后,软弱下卧层顶面的附加应力减少量较小。因此,对于小尺寸承台桩基,采用 08 规范的验算方法偏危险;对于大尺寸承台桩基,采用 08 规范的验算方法影响不大。

结合上面的讨论,对于承台尺寸较小的桩基(例如柱下独立群桩基础),自重应力的计算应参照 94 规范,即将承台上土的自重考虑在内;对于承台尺寸较大的桩基(例如桩-箱基础),自重应力可参照 08 规范,即不包含承台上土的自重。

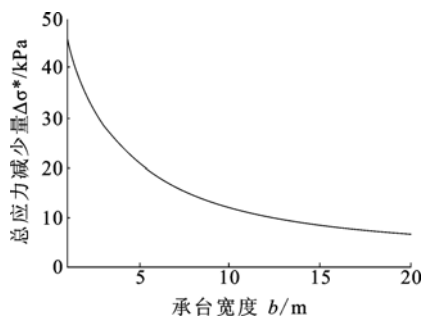


图 3 方形承台尺寸对附加应力的影响

事实上,在计算软弱下卧层顶面附加应力时应将  $G_k$  取为承台的超重与桩身的超重之和,而在计算自重应力时应将承台上土的自重考虑在内。这样计算可以消除承台上土自重的影响,比规范给出的公式更合理,概念上也更清楚。

## 2 关于侧摩阻力的取值

在软弱下卧层承载力验算时,群桩实体基础的侧摩阻力被当作了分析系统的一个外力,而实质上侧摩阻是半空间系统内的一个内力。地基土对实体基础产生向上的侧摩阻力,反过来实体深基础对土体也产生向下的侧摩阻力。这样,在桩群外侧土体中将产生向下的压力,这个压力既会在群桩实体基础外侧传递,也会向群桩实体基础范围内传递。

因此,在软弱下卧层顶面的 AB 范围内,不仅作用的有总附加应力,也会有  $2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i$  扩散到该范围的部分。所以在附加应力的计算中直接减去  $2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i$  是偏于危险的。另一方面,侧摩阻力扩散到桩群范围之外的应力成为软弱下卧层顶面 AB 范围外的旁压荷载,这在一定程度上又提高了软弱下卧层的承载力,将这种不利与有利的影响综合考虑,大体上还算合理。但侧摩阻力  $2(A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i$  向软弱下卧层顶面

AB 范围内传递了多大的力以及软弱下卧层顶面 AB 范围内的旁压荷载会对承载力具体提高多少是很复杂的问题,这种定量分析还需借助数值计算进行深入研究。

对于群桩实体深基础的侧摩阻力,94 规范取为总的极限侧摩阻力,而 08 规范则取为 3/4 的总极限侧摩阻力,这在一定程度上抵消了侧摩阻向下传递的影响。可见,在侧摩阻力取值方面,08 规范偏安全一些。08 规范条文说明中指出,扣除 3/4 而不是 1/2 的总极限侧阻力主要是考虑荷载传递机理,在软弱下卧层进入临界状态前基桩侧阻已接近极限。

另外,从式(1)与式(3)可以看到,作用于承台上的作用效应取的是荷载效应标准组合,而土的抗力取为极限侧摩阻力标准值。前者为工作状态,后者为极限状态,两者存在概念不协调的问题。对于侧摩阻力取值的问题,还需进一步研究。

总之,考虑到群桩基础在实际工作状态下,并不一定达到极限状态,本文建议取 1/2 倍的桩侧极限摩阻力,即桩侧摩阻力的特征值。

## 3 桩距大于 6 倍桩径的情况

94 规范规定,对于桩距  $S_n > 6d$ 、且硬持力层厚度  $t < (S_n - D_e) \cos \theta$  的群桩基础以及单桩基础(见图 4),其  $\sigma_z$  值按式(6)计算:

$$\sigma_z = \frac{4(\gamma_0 N - u \sum q_{sik} l_i)}{\pi(D_e + 2t \tan \theta)^2} \quad (6)$$

式中:  $N$  为桩顶轴向压力设计值;  $u$  为基桩桩身周长;  $D_e$  为桩端等代直径,对于圆形桩端,  $D_e = d$ ; 方形桩,  $D_e = 1.13b$  ( $b$  为桩的边长)。

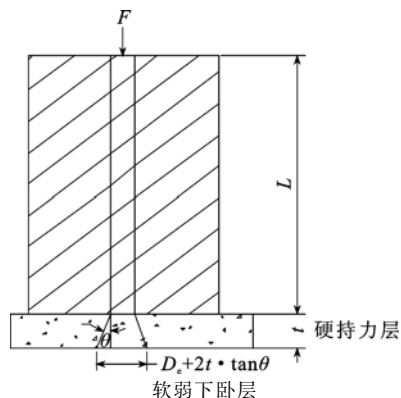


图 4 单桩软弱下卧层承载力验算

08 规范中并没有对桩距大于 6 倍桩径的情况进行规定。08 规范给出的理由是:存在软弱下卧层的情况,当桩端下硬持力层厚度不小于  $3d$  时,可不进行基桩单独冲剪破坏验算;且当存在软弱下卧层时,桩端以下硬持力层厚度不宜小于  $3d$ 。

为了便于工程设计,建议从安全角度建议仍采用 94 规范中的相应规定,对桩距大于  $6d$  的情况进行验算<sup>[5]</sup>,软弱下卧层顶部附加应力按式(7)计算:

$$\sigma_z = \frac{4(\gamma_0 N_k - 0.5u \sum q_{sik} l_i)}{\pi(D_e + 2t \tan \theta)^2} \quad (7)$$

式中: $N_k$  为桩顶轴向压力标准值; $\sigma_z$  为对应于桩顶轴向力标准值的在软弱下卧层顶部的附加应力。

式(7)相对于式(6)将  $u \sum q_{sik} l_i$  的系数改为 0.5 是考虑到关于侧摩阻力取值的讨论,将侧摩阻力取值由极限值改为特征值。

#### 4 群桩软弱下卧层承载力验算建议

结合以上讨论,当桩距小于 6 倍桩径时,对于小尺寸群桩基础(例如柱下独立基础、柱下条形基础、墙下条形基础等)的情况,建议采用式(8)、式(9)进行验算:

$$\sigma_z + \gamma_m(l+h+t) \leq f_{az} \quad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{(F_k + G_k) - (A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i}{AB} \quad (9)$$

对于带有地下室的桩-箱(筏)基础,建议采用式(10)、式(11)进行验算:

$$\sigma_z + \gamma_m(l+t) \leq f_{az} \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{(F_k + G_k) - (A_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i}{AB} \quad (11)$$

式中: $f_{az}$  为软弱下卧层经深度  $z$  修正的地基承载力特征值。

#### 5 结论

1) 桩基础软弱下卧层承载力验算应综合考虑基础结构类型与荷载组合条件进行,现有方法均存在概念不清的问题,有待于进一步认真研究。

2) 桩基软弱下卧层验算中承台上土的自重的计算应根据基础结构形式区别对待。对于带有地下室

的桩-箱(筏)基础,自重应力计算按照 94 规范计算显得过于保守,08 规范则比较合理;但是对于小尺寸群桩基础(例如柱下独立基础、柱下条形基础、墙下条形基础)的情况,自重应力按照 08 规范计算就偏于危险,宜按照 94 规范计算。

3) 从实际情况与安全角度分析,附加应力的计算中,不论是 94 规范还是 08 规范,扣除的桩侧摩阻力极限值是偏于危险的,且存在荷载组合概念不协调现象,建议侧摩阻力取为 1/2 倍的极限摩阻力,即摩阻力特征值。

4) 对桩距大于 6 倍桩径的群桩基础及单桩基础也应进行软弱下卧层承载力的验算,软弱下卧层顶部附加应力采用式(7)计算。

5) 桩距小于 6 倍桩径情况下的软弱下卧层承载力验算:对小尺寸群桩基础,建议应按照式(8)及(9)进行验算;对于带有地下室的桩-箱(筏)基础,建议采用式(10)及式(11)进行验算。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准. JGJ 94-1994 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [2] 中华人民共和国行业标准. JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] 李广信,张在明. 关于桩基软弱下卧层验算的几点认识[J]. 岩土工程技术,2007,21(3):109-122.
- [4] 李小倩,李 辽. 桩基软弱下卧层计算公式分析[J]. 低温建筑技术,2009(6):84-85.
- [5] 苏国全,张贵双,朱振海,等. 桩基础软弱下卧层验算模型的探讨[J]. 河北建筑科技学院学报,2004,21(2):72-75.

收稿日期:2012-10-12