

散体材料桩复合地基承载力计算

中国兵器工业北方勘察研究院 王长科

【摘要】 本文提出了应用旁压试验结果确定散体材料桩复合地基承载力的计算方法,并对其中的几个问题进行了探讨。

【Abstract】 The Calculative method of bearing capacity of composite foundation with material is proposed by using the results of pressuremeter test. And several problems are discussed in this paper.

一、前言

散体材料桩系指用散体材料(如碎石、砂、砂石等无胶凝材料)制成的桩。这类桩的特点是:桩体材料无凝聚力, $c_p = 0$, 桩的承载力取决于桩材的内摩擦角 φ_p 和桩周土对桩体的约束侧限力。

当前,确定散体材料桩复合地基承载力的办法主要有:载荷试验法、理论计算法和经验类比法。由于载荷试验费用高、时间长,因而工程设计上除复杂工程外,常采用理论计算法进行承载力计算。承载力计算的基本表达式为:

$$f_c = mf_p + (1-m)f_s \quad (1)$$

式中 f_c ——复合地基承载力;

f_p, f_s ——桩及桩间土的承载力;

m ——复合地基置换率。

其中,散体材料桩承载力 f_p 的计算方法目前主要有Hughes和Wither(1974)、Wong H.Y (1975)、J.Brauns (1978)、Broms (1979)、Vesic扩张理论、和龚晓南(1990)等。这些方法都是先依据土的物理力学指标和土的原位水平应力等计算桩周土对桩的径向围限力 p_r , 然后按 $f_p = p_r \cdot tg^2\left(45 + \frac{\varphi_p}{2}\right)$ (φ_p 表示桩材的内摩擦角) 计算桩的承载力。

桩周土对桩的径向围限力 p_r 的计算式较多,如:

$$\begin{aligned} \text{Wong建议: } p_r = & qtg\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \\ & + 2ctg^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \end{aligned}$$

$$\text{J.Brauns建议: } p_r = \frac{2c}{\sin 2\delta} \left(\frac{tg\delta_s}{tg\delta} + 1 \right)$$

这些理论假定基本符合实际,推导严密,但 p_r 的计算公式中所涉及的指标参数,想准确取值较难,有时与实际不符,甚至出入较大,这给实际应用带来困难和人为失误。笔者在学习和研究了复合地基的理论与实践之后,觉得散体材料桩在受到竖向荷载后,在竖向发生压缩的同时,侧向发生膨胀,然后以膨胀或整体剪切形式发生破坏,桩体在破坏前的受力变形情况与旁压试验极为相似。由此可采用旁压试验来确定桩间土对桩周约束力,即桩周土对桩的径向围限力,旁压试验可在打桩前的天然土或成桩后的桩间土中进行,如此不仅准确可靠,而且也经济方便。

二、旁压试验的原理*

旁压试验是将可横向膨胀的圆柱形旁压器竖直放入到地基中的竖向钻孔内,通过加压,使旁压器横向扩张,从而量测钻孔横向扩张的受力变形性质,这实际是一种横向载荷试验。旁压试验典型结果见图1。

在旁压试验初期,孔周土径向应力 σ_r 增加,环向应力 σ_θ 减少,当孔壁压力 $p = p_f$ (p_f 表示旁压试验临塑压力)时,孔壁土体进入塑性应力状态。若 $p_f < q_0$ (q_0 表示试验点上覆土压力),则称为第一塑性应力状态;钻孔内压力继续增加,待试验压力 $p < q_0$ 时,

* 王长科. 对旁压试验中几个问题的分析和试验研究(硕士论文)。华北水电学院北京研究生部。1987

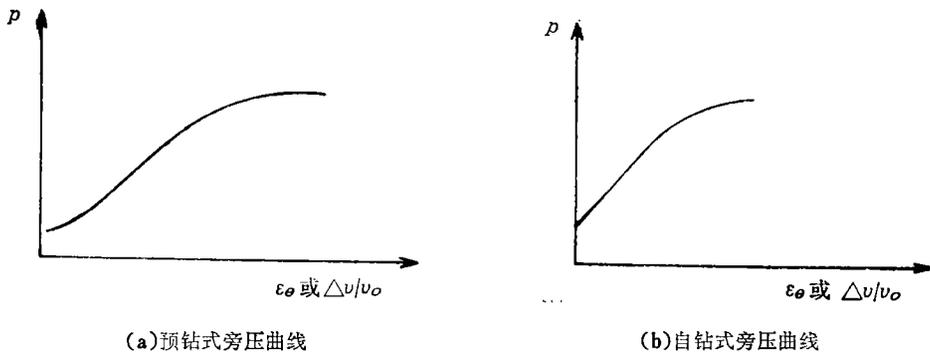


图 1 典型旁压试验结果

孔壁土便进入第二塑性应力状态，在第二塑性区， σ_r 、 σ_θ (σ_θ 表示环向应力)均随 p 的增加而增加；当 σ_θ 增至 q_0 时，孔壁土进入第三塑性应力状态，此时钻孔达极限状态。

出现第一塑性应力状态 ($p_f < q_0$) 时 p_f 表达式为：

$$p_f = \frac{2c_s \cdot \cos \varphi_s}{1 + \sin \varphi_s} + 2\sigma_{k0} - q_0 \cdot \frac{1 - \sin \varphi_s}{1 + \sin \varphi_s} \quad (2a)$$

若不出现第一塑性应力状态 ($p_f \geq q_0$) 而直接出现第二塑性应力状态，则：

$$p_f = c_s \cdot \cos \varphi_s + \sigma_{k0} (1 + \sin \varphi_s) \quad (2b)$$

极限压力 p_l 为：

$$p_l = 2c_s \cdot \frac{\cos \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} + q_0 \cdot \frac{1 + \sin \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \quad (3)$$

式中 p_f 、 p_l ——旁压试验临塑压力和极限压力；

σ_s 、 φ_s ——土的粘聚力和内摩擦角；

σ_{k0} 、 q_0 ——试验点原位水平应力和竖向应力。

三、散体材料桩的承载力计算

从上述不难看出，桩周土对桩的约束力可采用旁压试验求得的 p_f 和 p_l 值，散体材料桩的承载力可按下式计算：

$$f_{pa} = p_f \cdot \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi_p}{2} \right) \quad (4)$$

$$f_{pl} = p_l \cdot \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi_p}{2} \right) \quad (5)$$

式中 f_{pa} 、 f_{pl} ——散体材料桩的容许承载力和极限承载力；

φ_p ——散体材料桩桩材的内摩擦角；

p_f 、 p_l ——基底下 0~2 倍桩径深度范围内的旁压试验临塑压力和极限压力。

在复合地基设计时，散体材料桩承载力的确定除要考虑地基稳定〔按式(4)、(5)〕外，尚应考虑桩顶的许可沉降。

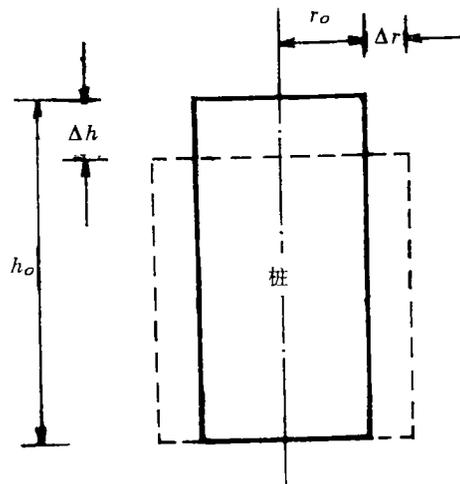


图 2 散体材料桩压缩计算简图

如图 2 所示，设桩在受到轴向荷载前的尺寸为 $\phi 2r_0 \times h_0$ ，受压后尺寸为 $\phi 2(r_0 + \Delta r) \times (h_0 - \Delta h)$ 则：

$$\epsilon_a = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta r}{r_0} \quad (7)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta v}{v_0} \quad (8)$$

式中 ε_a ——桩的轴向应变，以压缩为正；
 ε_{θ} ——桩柱侧面的环向应变，以拉伸为正；
 ε_v ——桩体的体积应变，以膨胀为正。

按几何学原理不难导出：

$$\varepsilon_{\theta} = \sqrt{\frac{1 + R\varepsilon_a}{1 - \varepsilon_a}} - 1 \quad (9)$$

$$\varepsilon_a = \frac{(1 + \varepsilon_{\theta})^2 - 1}{(1 + \varepsilon_{\theta})^2 + R} \quad (10)$$

$$\varepsilon_v = \frac{e - e_0}{1 + e_0} \quad (11)$$

式中 R ——膨胀比率， $R = \varepsilon_v / \varepsilon_a$ ；
 e_0, e ——变形前后的桩体孔隙比。
 ε_{θ} 与 $\varepsilon_a, \varepsilon_v$ 的关系曲线见图3。

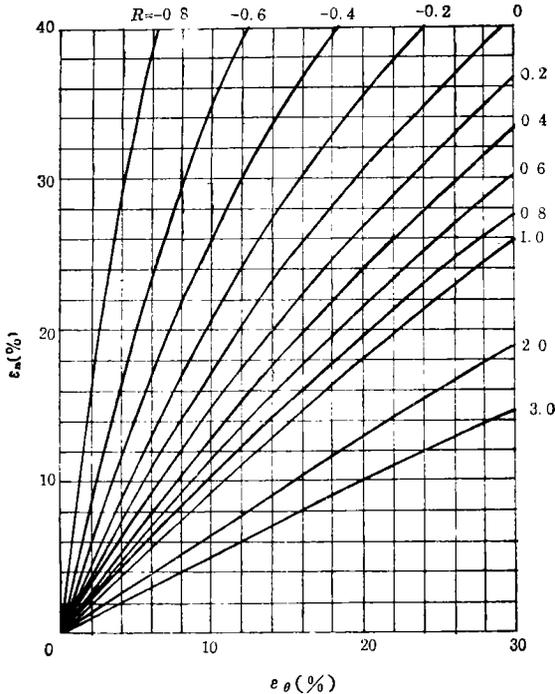


图3 ε_{θ} 与 $\varepsilon_a, \varepsilon_v$ 的关系曲线(据式10)

我们可以看出，若已知桩顶许可沉降 s ，则按 $\varepsilon_a = \frac{s}{h_0}$ (h_0 通常取2倍桩径)计算出 ε_a ，

结合 ε_v (ε_v 按式(11)计算，其中 e, e_0 可按桩的相对密度来估算)查图3或代入式(9)求出 ε_{θ} ，然后根据 ε_{θ} 查旁压曲线图(如图1)，从而求出相应于 ε_{θ} 即相应于许可沉降为 s 时的桩周径向约束力 p_{rs} ，按下式计算桩的承载力：

$$f_{ps} = p_{rs} \cdot \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi_{ps}}{2} \right) \quad (12)$$

式中 f_{ps} ——相应于桩顶许可沉降为 s 时的桩体承载力。

φ_{ps} ——相应于桩顶许可沉降为 s 时桩体材料发挥出来的内摩擦角。

$$\text{不难求得 } \varphi_{ps} = \text{arc sin} \frac{k_s - 1}{k_s + 1}$$

式中 k_s 是相应于桩顶许可沉降为 s 时桩的竖向应力与水平向应力之比，即 $k_s = f_{ps} / p_{rs}$ 。当 $s = 0$ (或在弹性变形范围内)时，则桩体处于 k_0 状态，这时

$$k_s = \frac{f_{ps}}{p_{rs}} = \frac{f_{ps}}{k_0 f_{ps}} = \frac{1}{k_0}$$

$$\text{此时 } \varphi_{ps} = \text{arc sin} \frac{1 - k_0}{1 + k_0}$$

当 $s \rightarrow \infty$ (或出现塑性变形)时，桩体处于塑性状态，此时

$$k_s = \frac{f_{ps}}{p_{rs}} = k_p = \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi_p}{2} \right)$$

故 $\varphi_{ps} = \varphi_p$

实践表明，由于散体材料桩弹性变形很小，在设计荷载(承载力设计值)下一般均已出现塑性变形，故 φ_{ps} 一般可按 $\varphi_{ps} = \varphi_p$ 取值。

式(12)实际是针对成孔工艺为非挤土式的预成孔散体材料桩而言的，若桩的成孔工艺为挤土式(如沉管法)，则桩周土的径向约束力 p_r 在挤土成孔过程中早已达到旁压试验极限压力，在桩后桩周约束力不再随桩的竖向压缩(受荷)而增加。此时按式(4)、(5)计

算即可。

四、复合地基承载力计算

复合地基承载力计算的基本公式见式

(1) 若用两个系数 λ_1 、 λ_2 来分别表示桩及桩间土在基础下受荷时的强度增长(因桩与桩间土共同承担上部荷载和桩体具排水、挤密等作用,故桩体和桩间土承载力均会提高),则式(1)可写为:

$$f_o = \lambda_1 m f_p + \lambda_2 (1 - m) f_s \quad (13)$$

这一基本概念在土工界已普遍使用,这是毋庸置疑的。本文主要讨论 λ_1 、 λ_2 取值及 f_p 、 f_s 的取值问题。

1. λ_1 、 λ_2 的取值

桩与桩间土共同承担上部荷载后,桩的承载力因桩周约束力的增加而提高,由式(3)、(1)、(13)可知

对一般粘性土:

$$\lambda_1 = 1 + \frac{\Delta q}{\frac{2c_s \cos \varphi_s}{1 + \sin \varphi_s} + q_0} \quad (14)$$

式中 Δq ——桩间土的竖向附加压力,

$$\Delta q = q - q_0.$$

q_0 ——加荷前桩间土的竖向土压力。

对于饱和软粘土: $\varphi_s \approx 0$, 采用不排水指标, 则

$$\lambda_1 = 1 + \frac{\Delta q}{2c_s + q_0} \quad (15)$$

对于砂土: $c_s = 0$,

$$\lambda_1 = 1 + \frac{\Delta q}{q_0} \quad (16)$$

当采用室内试验指标代入上式计算 λ_1 值时, 要注意试样的受荷剪切方向应与实际情况一致。作者1992年曾对用旁压试验测的抗剪指标(c 、 φ)和用室内常规三轴试验测的抗剪指标(c 、 φ)进行了对比, 发现二者 φ 值基本相同, 而旁压 c 值一般是室内 c 值的4倍。如此, 在用常规三轴试验指标计算时, 要考虑这种差异, 或直接将式(14)、(15)改写为:

一般粘性土:

$$\lambda_1 = 1 + \frac{\Delta q}{8c_s \cdot \frac{\cos \varphi_s}{1 + \sin \varphi_s} + q_0} \quad (17)$$

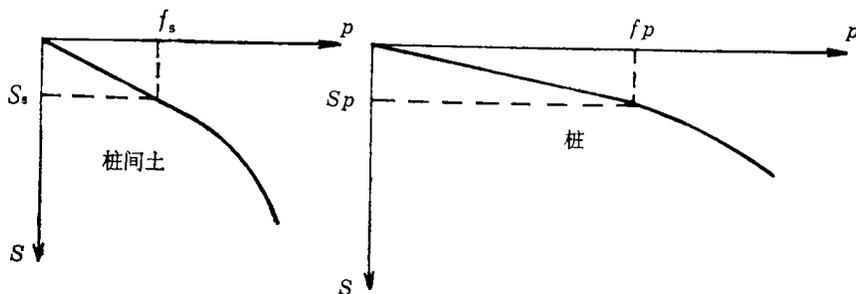
饱和软粘土:

$$\lambda_1 = 1 + \frac{\Delta q}{8c_s + q_0} \quad (18)$$

λ_2 值反映了桩间土的强度变化, $\lambda_2 > 1$ 表示强度增长, $\lambda_2 < 1$ 则表示强度降低。 λ_2 的取值应考虑到设计情况组合、桩间土的灵敏度、渗透系数、排水条件和强度时效, 一般地 $\lambda_2 = 0.8 \sim 1.2$ 。

2. f_p 、 f_s 的取值

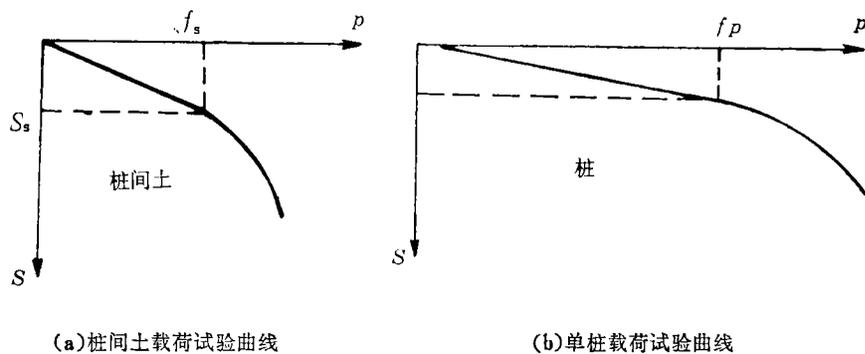
式(13)的计算思路是, 先计算对桩间土单独加荷(天然地基)时的地基承载力 f_s , 和对桩单独加荷时(单桩)的单桩承载力 f_p , 然后用 λ_1 、 λ_2 两个系数进行强度修正, 计算桩土共同承担上部荷载时的复合地基承载力。因此 f_p 、 f_s 的取值要考虑复合地基之上的垫层和基础的刚度的大小。若垫层和基础为刚性的, 则桩和桩间土满足等应变条件, f_p 和 f_s 的取值要相应于同一沉降值(图4)。



(a) 桩间土载荷试验曲线

(b) 单桩载荷试验曲线

图4 等应变取值 ($s_p = s_s$)



(a) 桩间土载荷试验曲线

(b) 单桩载荷试验曲线

图 5 非等应变取值 ($s_s > s_p$)

若垫层和基础为柔性的，则复合地基受荷后，桩和桩间土的受力变形情况会发生再调整，使得桩间土和桩不满足等应变条件，桩间土的变形大于桩的变形。如图 5 示， f_p 、 f_s 的取值要考虑到桩和桩间土的非等应变条件。取值时，土的变形可大于桩的变形。

五、结束语

本文提出了应用旁压试验结果来计算散体材料桩复合地基承载力的方法，并对其中的几个问题进行了探讨。不难看出，采用文中所述方法，可求得散体材料桩复合地基相

应于不同基础沉降时的承载力，承载力不是固有不变值，很重要的一个方面，承载力的大小和许可沉降值的大小密切相关。想必这一概念在实践上是十分重要的。

参 考 文 献

- 1 地基处理手册编委会. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988
- 2 龚晓南. 复合地基. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- 3 王长科. 用旁压试验原位测定土的强度参数. 勘察科学技术, 1992年第6期

(上接第2页)

精确，热衷于搞出一些脱离实际的“新理论”、“新方法”。写文章、写报告、洋洋大观，内容深奥，使人望而生畏，以为这样才体现出水平，而实际上，这样的大量劳动往往是作了很多无效的工作。这难道还不应该引起我们的注意吗？

如何掌握好科学研究的方向，解决好理论与实践相结合的问题，始终是科技发展中的一个重要问题，也是一个如何培养人才，造就科技接班人的问题。我院建院四十年来，许多老科技专家为我们已经作出了楷模，院内外的经验证明，在土力学和岩土工程方面，凡是在科技事业上作出卓越贡献的专家首先

应该是经验丰富的工程师，他们活跃于生产科研第一线，涉足于每一时期的重大工程。他们善于正确地估价和熟练地运用各种试验手段和理论工具，所有这些与他们丰富的经验相结合，进行正确的综合判断，解决重大实际工程问题，从而推动了理论的发展，我们完全相信，朝气蓬勃的年青一代必然会在科学技术的道路上超越他们的前人，创造出更丰硕的成果来。

参 考 文 献

- 1 黄文熙. 土的工程性质. 水利电力出版社, 1983
- 2 李广信. 关于土力学理论发展的一些看法. 岩土工程学报, 第13卷第5期, 1991