

您现在的位置: 首页 >> 四川建筑杂志 - 精选文章

## 柔性基础半刚性桩复合桩基沉降计算方法

(所属杂志: 此文章来自原稿) 发布时间: 2009-07-07 已阅读: 1645

曾小波, 彭雄志, 陈利容

(西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031)

**摘要:** 通过对柔性基础和刚性基础受力性状对比分析, 针对柔性基础下桩体的刺入变形, 提出采用修正的桩身压缩模量法计算复合地基加固区土层压缩量。在对下卧层沉降计算中, 利用Mindlin解和Boussinesq解联合求解地基附加应力, 然后用分层总和法求得下卧层沉降。

**关键词:** 柔性基础; 复合桩基; 刺入变形量; Mindlin解; Boussinesq解

中图分类号: TU433

文献标识码: A

复合地基<sup>[1]</sup>作为一种地基处理技术, 在我国土建工程中已得到广泛的应用与发展。采用复合桩基处理地基主要有两个目的: 其一是提高天然地基的承载力; 其二是减小地基沉降量及不均匀沉降。许多工程采用复合地基主要是为了减少沉降。因此复合地基沉降计算在复合地基设计中具有相当重要的地位。但就目前的认识水平, 复合地基沉降计算水平低于复合地基承载力计算水平, 也远远落后于工程实践的需要。这就给复合地基的设计带来一定的困难。因此对复合地基沉降理论的研究具有相当重要的现实意义。

### 1 柔性基础下复合桩基性状

模型试验研究<sup>[2]</sup>表明, 柔性基础和刚性基础有着不同的破坏模式。刚性基础下, 复合地基随着荷载增加桩体先达到极限状态然后造成复合地基破坏。柔



四川建筑杂志

四川建筑杂志

精选文章

杂志简介

广告刊例

编委会名单

投稿须知



站内搜索

请输入关键字

搜索

性基础上, 桩间土先进入极限状态, 导致桩体荷载集中系数增加, 之后荷载的增加主要由桩承受, 进而造成复合地基破坏。还有研究指出<sup>[3],[4]</sup>, 柔性基础下复合地基桩体不但有刺入下卧层的趋势, 而且有刺入柔性基础的趋势。这些与刚性基础有着显著的区别。因此, 将刚性基础下复合地基沉降计算方法应用于柔性基础下复合地基沉降计算是不合理的也是不安全的, 不能反映柔性基础下实际变形情况。因此, 本文将对柔性基础复合地基的沉降计算方法作出讨论。

目前, 复合地基沉降计算方法有很多, 但较统一看法都是把得复合地基的沉降分为两部分。即为加固区土层压缩量 $S_1$ 和下卧层土层的压缩量 $S_2$ 。本文对柔性基础的沉降计算分析中, 仍分为加固区土层沉降 $S_1$ 和下卧层土层沉降 $S_2$ 分别进行计算。最后得出复合地基总沉降量。即柔性基础复合地基总沉降 $S$ 的表达式为 $S = S_1 + S_2$ , 如图1所示。

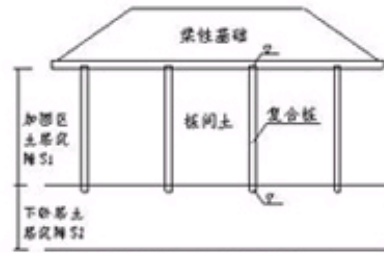


图1 复合桩基沉降计算简图

## 2.1 加固区土层压缩量 $S_1$ 计算

传统的对加固区土层压缩量 $S_1$ 的计算, 通常采用复合模量法、应力修正法、桩身压缩量法。然而对于柔性基础(如道路路基荷载)复合地基, 桩不仅有刺入下卧层的趋势, 而且有刺入柔性基础的趋势, 由于这三种方法都不能很好的反应桩的刺入变形。笔者在此针对柔性基础复合地基, 提出了修正的桩身压缩量法, 该方法认为加固区土层的压缩量 $S_1$ 等于桩身压缩量 $S_p$ 、刺入柔性基础 $\Delta_{\pm}$ 和桩体刺入下卧层 $\Delta_{\nabla}$ 之和。其计算式为:  $S_1 = S_p + \Delta_{\pm} + \Delta_{\nabla}$  (1)

### 2.1.1 桩身压缩量 $S_p$ 的计算

根据对复合地基桩身应力传递的试验研究<sup>[5]</sup>所得的桩身应力随深度的传递曲线, 可近似推算出桩侧摩阻力随深度的分布函数如图2所示, 由图2可知, 摩阻力在桩的顶部发挥很小, 几乎为0, 到桩顶 $H_1$ 深度处摩阻力发挥最大, 随之逐渐减小, 桩端处也接近于0。

根据桩侧摩阻力分布图, 结合桩顶处桩土应力比可得桩顶所受荷载, 可计算出桩的轴力沿深度 $Z$ 的变化情况, 利用弹性理论中杆件压缩公式, 对桩身进行积分。即可求得桩身的压缩量

$S_p$ , 其具体计算公式如下:

$$S_p = \int_0^H \frac{P_p(z)}{E_p(z, p)} dz + \int_H^H \frac{P_p(z)}{E_p(z, p)} dz \quad (2)$$

式中:  $P_p(z)$ —为桩身在 $Z$ 深度处的轴力;

$E_p(z, p)$ —为桩身弹性模量;

### 2.1.2 桩体刺入变形量 $\Delta_{\pm}$ 、 $\Delta_{\nabla}$ 的计算

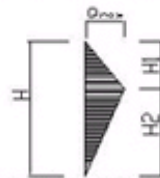


图2 桩侧摩阻力分布图

桩体刺入变形量 $\Delta_{\pm}$ 、 $\Delta_{\nabla}$ 的计算可根据Vesic小孔扩张理论进行计算<sup>[6]</sup>。

(1) 对于Mohr—Coulomb材料球形孔极限扩孔压力 $p_e$ 为:

$$p_e = \frac{4(c \cos \phi + \sigma_0 \sin \phi)}{3 - \sin \phi} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_0$ 为土的初始应力。

(2) 塑性区的最大半径 $r_p$ 为:

$$r_p = \left[ \frac{c \cot \phi + \sigma_0 + p}{c \cot \phi + \sigma_0 + p_e} \right]^{\frac{1+\mu}{1-\mu}} \quad (4)$$

式中:  $r_i$ 为球形孔初始半径。

(3) 当 $r = r_p$ ,  $p = p_e$ 时, 可得弹塑性交界面上土体体积径向位移为:

$$u = \frac{1+\mu}{1-\mu} r_p \quad (5)$$

(4) 球孔体积变化为:

$$V = V_1 + V_2 = \frac{2\pi}{E} [3(1-u)r_s^3 p_s - 2(1-2u)pr^3] \quad (6)$$

式中:  $V_1, V_2$  分别为球孔弹性、塑性体积变化。

(5) 设桩端力为  $p_s$ , 作用于半球面的球形扩张力为:

$$p_s = \frac{p}{\pi r^2} \quad (7)$$

(6) 当桩端贯入深度为  $\Delta$  时, 其贯入体积为:

$$V_s = \pi r_s^2 \Delta \quad (8)$$

(7) 由于是半球面贯入, 根据贯入体积等于球形体的弹塑性体积变化可得:

$$V_s = \frac{1}{2} V \quad (9)$$

(8) 当  $p_s < p_c$  时, 代入球形孔弹性体变  $V_1$  得:

$$\Delta = \frac{1+u}{E} r_s p_s \quad (10)$$

(9) 当  $p_s \geq p_c$  时, 代入式 (11) 得:

$$\Delta = \frac{r_s}{E} \left[ 3(1-u) \left( \frac{r_s}{r} \right)^3 p_c - 2(1-u) p_s \right] \quad (11)$$

## 2.2 复合地基下卧层土层压缩量 $S_2$ 计算

在复合地基总沉降中, 桩身的压缩量和垫层的压缩量一般较小, 桩的刺入量和桩下土层的压缩量可能是复合地基产生较大沉降量的主要原因, 若桩下压缩层厚度较厚时, 桩下土层压缩量所占的比例最大。因此, 对下卧层沉降的计算显得尤为重要, 现有复合地基下卧层土层压缩量

$S_2$  的计算中, 通常都是采用分层总和法, 而争论的焦点都集中在下卧层附加压力的计算。现有的附加压力计算理论主要有应力扩散法、等效实体法、改过的Geddes法、当层法等。但这些方法都没有考虑桩土之间的相互作用。鉴于这种情况, 本文将利用弹性理论中Mindlin解与Boussinesq解联合求解下卧层附加应力。

### 2.2.1 Mindlin解与Boussinesq解联合求解地基附加应力

此法将加固区的桩、土分开来考虑, 桩顶受到的荷载通过桩侧的摩擦力和桩端力传递到复合地基中, 桩侧摩擦力与桩端阻力引起土中任意一点的应力可以用Mindlin解来求解, 桩间土上所受均布荷载引起土中任意一点应力可以用 Boussinesq 解来求得, 然后两者叠加就可以求出地基的附加应力。具体计算过程如下。

$$\sigma_z = \sigma_{\text{桩}} + \sigma_{\text{土}}$$

式中:  $\sigma_{\text{桩}}$  一为桩身受力引起的地基附加应力;

$\sigma_{\text{土}}$  一为桩间土承受荷载引起的地基附加应力。

$\sigma_{\text{土}}$  的计算用Boussinesq 解求得:

$$\sigma_{\text{土}} = \iint_{\infty} \frac{3prz^3}{2\pi R^5} dx dy$$

$$\text{式中: } r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$$

$$R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}$$

$\sigma_{\text{桩}}$  的计算可以用Mindlin解求得:

$$\sigma_{\text{桩}} = \sigma_d + \sigma_c \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{p_{ij}}{8\pi(1-u)} \left[ \frac{(1-2u)(z-H)}{R_1^3} + \frac{(1-2u)(z-H)}{R_2^3} - \frac{3(z-H)^3}{R_1^3} - \frac{3(3-4u)z(z+H)^2 - 3H(z+H)(5z-H)}{R_2^3} - \frac{30zH(z+H)^3}{R_2^3} \right] \right\}$$



$$z_2 = \sqrt{(x_q - x_0)^2 + (y_q - y_0)^2} + (z_0 + H)$$

$\sigma_d$ —为桩端力引起桩端下地基内任意一点的附加应力;

$p_d$ —为桩端阴力。

$\sigma_c$ —为桩侧摩阻力引起桩端下地基内任一点的附加应力;

$p_c$ —为距桩顶 $\xi$ 距离处桩侧摩阻力的分布集度;

$x_q, y_q$ —为桩在水平面上的坐标值;

$x_0, y_0, z_0$ —为所求应力点的坐标;

H—为桩长或加固区深度。

### 2.2.2 下卧层沉降量 $S_2$ 的求解

根据Mindlin解与Boussinesq解的联合求解附加应力后,可以采用分层总和法求得复合地基下卧层的压缩变形 $S_2$ :

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \frac{e_{2i} - e_{1i}}{1 + e_{1i}} H_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E_{si}} H_i$$

式中:  $\Delta P_i$ —为第i层土的附加应力增量;

$H_i$ —为第i层土的厚度;

### 3 实例分析

为将计算结果与实际工程实测值进行对比,根据某铁路路堤软土地基CFG桩加固试验研究报告。该试验段地基土各层的岩性及主要物理力学指标如表1,分述如下:

1.淤泥,浅灰色,流塑,手感细腻,分布均匀,含少量腐植物,有机质含量2.8~7.9%,局部夹粉细砂透镜体,具高压缩性、低强度的特点,灵敏度标准值7.1,属灵敏性粘土。层厚10.5~19.7m。

2.粉质粘土,褐黄色、灰绿色、浅灰等色,软硬分布不均,海陆交互相成因夹粗砂、砾石、碎石土、淤泥质粘土等透镜体,厚3.6~28m。

表1 地基土物理力学指标

土层	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	凝聚力 (Kpa)	内摩擦角 (度)	压缩模量 (MPa)
淤泥	1.59	4.62	13.7	1.28
粉质粘土	1.89	33	16.3 5	4.84

该试验段采用CFG桩加固,桩间距1.6m,软土厚20m,桩长24m,打穿软土层,伸入持力层4m。要求桩体材料抗压强度不小于15MPa。

本文结合数学计算软件Matlab,利用该试验段的试验数据,采用本文计算方法计算得出结果与实测值的对比如表2如示:

表2 计算结果与实测值对比表

填土高度	桩顶应力 (Kpa)	桩间土应力 (Kpa)	桩土应力比	沉降量 (mm)
实测	254.4	41.9	6.07	85.6
计算值				96.3

从表2可以看出,采用本文计算方法所得结果为92.3mm,实测结果为85.6mm,采用本文计算方法所得结果偏大,误差为7%。分析原因,一方面可能是由于实际地质资料与试验数据之间存在误差所致,另一方面,也可能是因为在计算过程中四舍五入造成计算误差所致。但总体来说计算精度可以满足实际工程的要求,可用为一种对比计算方法。

### 4 结语

(1) 大量的研究和实践表明,柔性基础和刚性基础有着不同的受力性状和破坏模式,而现有的复合地基沉降理论大多都是在刚性基础作用下提出来的,不适

用于柔性基础沉降计算，因此需要建立柔性基础复合地基沉降计算理论

(2) 对柔性基础复合地基加固区沉降计算中，采用了修正桩身压缩量法计算，考虑了桩体刺入柔性基础的变形量的计算

(3) 对下卧层的附加应力计算中，利用Mindlin解与Boussinesq解联合求地基加应力，把桩、土分开进行计算，考虑了桩土之间的摩阻力，使得附加应力更接近实际地基应力分布。但在求解桩侧摩阻力和桩间土在下卧层产生的附加应力时，没有考虑桩阻效应的影响，下卧层的沉降可能会稍微偏大。

(4) 只有在桩身位移较小的情况下，桩侧摩阻力的分布近似呈三角形分布，而在桩身位移较大时，桩侧摩阻力沿桩身的分布则呈典型的“R”形。

#### 参考文献

- [1] 龚晓南. 地基处理技术发展展望[M].北京: 水利水电出版社, 2004.
- [2] 诸航. 复合桩基共同作用分析[M].杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [3] 温晓贵. 复合地基三维性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [4] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.