

刚性承台下考虑有效桩长的柔性桩复合地基沉降计算方法研究

孙林娜

(青岛理工大学 土木学院, 青岛 266033)

摘 要: 试验研究和理论分析表明, 柔性桩存在有效桩长。考虑刚性基础对桩顶部桩-土相对位移的限制, 假定桩侧摩阻力为双折线三角形分布, 根据桩-土协调变形, 推导出复合地基中柔性桩的有效桩长, 并在此基础上提出将柔性桩复合地基压缩层分为三层进行沉降计算。通过实例验证该方法有效且可行的。

关 键 词: 有效桩长; 复合模量; 柔性桩复合地基; 沉降

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Research on calculation of settlement of flexible piles composite foundation under rigid cushion cup

SUN Lin-na

(School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: Experimental study and theoretical analysis indicate that effective length of flexible piles exists. Considering the resistance of rigid foundation to the relative displacement between piles and soils, assuming the frictional resistance distributed as triangle form, and based on the pile-soil compatible deformation, the effective length of piles is deduced. And the settlement of flexible piles composite foundation is divided into three sections to be calculated. Comparing the method introduced in this paper with several other methods, it is proved that the method is effective and feasible.

Key words: effective pile length; composite modulus; flexible piles composite foundation; settlement

1 引 言

有效桩长 l_c , 又称临界桩长, 目前虽然还没有确切的定义, 但是人们对这个概念的理解还是比较一致的: 当桩的其他条件(桩的形状、截面积大小、桩身材料等)和地基土的特性一定时, 随着桩长的增加, 基桩承载力的增加渐趋缓慢。当桩长达到某一定值时, 承载力的增加几乎为 0, 即把这个定值称为基桩的有效桩长。在此状态下, 有效桩长以下那部分桩身对桩承载力的贡献可以忽略不计。这一概念也可以从沉降角度来定义: 在一定荷载作用下, 随着桩长的增大, 基桩桩顶沉降逐渐减小, 但当桩长超过某一极限时, 桩的沉降几乎不再发生变化, 即用增加桩长来减小沉降也存在一个极限长度, 这

个极限长度称为有效桩长。很多学者通过试验和实践研究得出: 不管是柔性桩还是刚性桩, 是复合地基还是桩基, 都存在有效桩长。但值得一提的是, 不论从承载力角度, 还是从沉降角度; 不论对单桩, 还是复合地基, 不同条件下桩体的有效桩长是不同的, 其概念不同, 数值也不同。

顾尧章等^[1]根据水泥搅拌桩的承载特性, 推导出纯摩擦桩的临界桩长:

$$l_c \geq 1.5d \sqrt{\frac{E_p}{E_s}} \sqrt{\frac{3\lambda(1+\mu_s)}{\lambda+2}} \quad (1)$$

式中: λ 为桩发生位移时带动四周土体的影响区范围。

陈善雄^[2]利用荷载传递函数法推导出临界桩长

的计算公式:

$$l_c = 2 \sqrt{\frac{dE_p S_m}{\tau_f}} \quad (2)$$

式中: S_m 为桩侧摩阻力临界位移值, 一般取 $S_m = 3 \sim 10$ mm; τ_f 为桩周土的极限摩阻力, 可根据静力触探资料或根据地区经验取值。

段继伟^[3]根据对水泥土搅拌桩的研究, 提出按桩-土模量比, 确定柔性桩有效桩长的取值范围: 当 $E_p/E_s = 10 \sim 50$ 时, $l_c = (8 \sim 20)d$; 当 $E_p/E_s = 50 \sim 100$ 时, $l_c = (20 \sim 25)d$; 当 $E_p/E_s = 100 \sim 200$ 时, $l_c = (25 \sim 33)d$ 。

舒翔等^[4]基于桩-土之间的位移协调原理, 推导出复合地基中柔性桩有效桩长的简化计算公式:

$$l_c = (4.7 \sim 5.2) r_0 \sqrt{\frac{E_p}{E_s}} \quad (3)$$

上述前 3 种方法都是根据单桩荷载传递规律推导的有效桩长, 第 4 种方法是在假定桩侧摩阻力为倒三角形分布的基础上得出的复合地基有效桩长。本文考虑刚性基础对桩顶部桩-土相对位移的限制, 假定桩侧摩阻力为双折线三角形分布, 根据桩土协调变形, 推导出复合地基中柔性桩的有效桩长。

2 刚性基础下柔性桩有效桩长的确定

2.1 桩侧摩阻力分布

柔性桩复合地基在荷载作用下依靠桩周摩阻力和桩端阻力把作用在桩体上的荷载传递给地基土体。桩侧摩阻力的发挥依靠在荷载作用下桩-土间存在相对位移趋势或产生相对位移。若桩-土间不存在相对位移或相对位移趋势, 则桩侧摩阻力为 0。桩端阻力的发挥则依靠桩端向下移动或存在位移趋势。现场实测试验资料表明, 桩侧摩阻力和桩端阻力并不是同步发挥的, 桩侧摩阻力的发挥早于桩端阻力的发挥。

承台下桩的荷载传递规律不同于一般研究的单桩荷载传递规律。一般研究的桩在地面处发生最大的桩-土相对位移, 因而侧摩阻力也最早得到发挥。而本章主要的研究对象是刚性基础下的柔性桩复合地基, 承台下的桩在承台的约束下桩顶处桩-土相对位移为 0 (不考虑垫层), 因而也没有侧摩阻力。根据段继伟等^[3]进行的水泥搅拌桩带台的荷载传递规律试验结果, 可以得出: 在有效桩长范围内, 桩侧阻力在桩顶几乎为 0, 沿有效桩长向下, 大约在距桩顶 $1/3$ 处达到极大值, 而后沿桩侧向下线性减小至 0。为计算方便可将刚性基础下柔性桩桩侧摩阻

力分布简化为图 1 的形式。

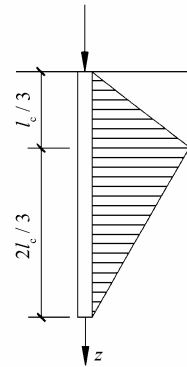


图 1 桩侧摩阻力分布的简化形式
Fig.1 Distribution of skin friction of piles

图 1 中, l_c 为有效桩长, 而不是实际桩长。在计算桩体压缩量的时候, 若 $l > l_c$, 取 l_c 作为计算长度; 若 $l < l_c$, 也取 l_c 作为计算长度, 在计算时, 在 l_c 上从桩顶往下截取 l 段长度进行计算, 截后剩下的摩阻力部分换算成桩端阻力计算。

桩侧面任一点 z 处的剪应力 τ 为

$$\tau = \begin{cases} \frac{P_p}{\pi r_0 l_c} \frac{3z}{l_c}, & (0 \leq z \leq l_c/3) \\ \frac{3P_p}{2\pi r_0 l_c} (1 - \frac{z}{l_c}), & (l_c/3 \leq z \leq l_c) \end{cases} \quad (4)$$

可得到桩身轴力 $P_p(z)$ 沿桩长的分布规律:

$$\left. \begin{aligned} P_{p1}(z) &= P_p (1 - \frac{3z^2}{l_c^2}), & (0 \leq z \leq l_c/3) \\ P_{p2}(z) &= \frac{3P_p}{2} (1 - \frac{z}{l_c})^2, & (l_c/3 \leq z \leq l_c) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.2 有效桩长确定

假定该层内桩体的变形模量不随深度和桩身应力而变化, 为应用方便, 忽略桩端位移不计, 假定桩顶位移全部来自桩身压缩, 则

$$s_p = \int_0^{l_c} \frac{P_p(z)}{E_p(z) A_p} dz = \int_0^{l_c/3} \frac{P_{p1}(z)}{E_p A_p} dz + \int_{l_c/3}^{l_c} \frac{P_{p2}(z)}{E_p A_p} dz = \frac{P_p}{E_p A_p} \left[\int_0^{l_c/3} (1 - \frac{3z^2}{l_c^2}) dz + \int_{l_c/3}^{l_c} \frac{3}{2} (1 - \frac{z}{l_c})^2 dz \right] = \frac{4P_p l_c}{9A_p E_p} \quad (6)$$

式中: p_p 为桩顶荷载; E_p , A_p 分别为桩身材料的弹性模量和桩身的横截面积。

一般受荷桩周围地基土的变形可理想地视为同心的圆柱体周围土体的变形, 根据弹性理论^[5]可以得到桩顶周围紧贴桩身表面的地基土的沉降变形为

$$s_s = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \ln(r_m / r_0) \quad (7)$$

假定桩的沉降与周围土体的变形相互协调, 即 $s_p = s_s$, 把式 (6) 和式 (7) 代入得

$$\frac{4P_p l_c}{9A_p E_p} = \frac{\tau_0 r_0}{G_s} \ln(r_m / r_0) \quad (8)$$

在本文假定的桩侧摩阻力分布形式下, 有 $p_p = \pi r_0 l_c \tau_0$, 解上式得

$$l_c = 3r_0 \sqrt{\frac{1}{2} (1 + \mu_s) \frac{E_p}{E_s} \ln(r_m / r_0)} \quad (9)$$

当土的泊松比取 0.5 时, 则

$$l_c = \frac{3}{2} r_0 \sqrt{3 \frac{E_p}{E_s} \ln(r_m / r_0)} \quad (10)$$

Cooke 通过试验认为, 一般当 $r_m > 20 r_0$ 后, 土的剪应变已很小, 可略去不计。因此, 将桩的影响半径 r_m 定为 $20 r_0$ 。文中取 $r_m = (12 \sim 20) r_0$, 代入上式得

$$l_c = (4.1 \sim 4.5) r_0 \sqrt{\frac{E_p}{E_s}} \quad (11)$$

3 刚性基础下柔性桩复合地基沉降

柔性桩复合地基加固区压缩量一般可用复合模量法计算, 下卧层压缩量可采用分层总和法计算, 地基中附加应力可采用压力扩散法或等代实体法计算。本文将复合地基压缩层从上到下分为 3 层: 第 1 层为加固区的临界桩长范围 ($0 \sim l_c$), 第 2 层为 ($l_c \sim h_1$) 段, 第 3 层为未加固的下卧层, 如图 2 所示, 其中 l_c 的计算公式为式 (11)。

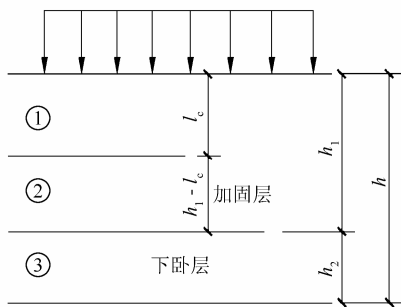


图 2 水泥土桩复合地基三层地基示意图

Fig.2 Schematic diagram of three-layered composite foundation

3.1 加固区有效桩长范围 ($0 \sim l_c$) 段沉降计算方法

本层主要考虑桩体本身的压缩量, 并以桩体的压缩量作为该层的变形值。设基底附加应力为 p , 则桩顶处作用于桩上的荷载 p_p 可用下式来求出:

$$p_p = \mu_p p = \frac{n}{1 + m(n-1)} p \quad (12)$$

桩身压缩量可通过下述积分表达式计算:

$$s_{11} = \int_0^{l_c} \frac{p_p(z)}{E_p(z, p)} dz \quad (13)$$

式中: $p_p(z)$ 为桩身应力沿深度 z 变化的表达式; $E_p(z, p)$ 为桩身变形模量, 可以是深度 z 和桩身应力的函数。由 2.2 节推导可得

$$s_{11} = \frac{4p_p l_c}{9E_p} \quad (14)$$

3.2 加固区 ($l_c \sim h_1$) 段沉降计算方法

该层可以将桩体和桩间土视为一复合土层, 桩体和桩间土同步变形。计算中的变形模量为文献[7]中考虑桩长和桩端土质影响所得到的桩-土复合模量值, 即

$$E_c = (1-m)E_s + mE_p \beta_0 \quad (15)$$

式中: $\beta_0 = \beta \lambda$, β_0 为桩体模量调节系数。

$$\left. \begin{aligned} \beta &= bl = \sqrt{\frac{k_1 l^2}{E_p A_p}}, k_1 = \frac{2\pi G_s}{\ln(r_m / r_0)}, \lambda = \frac{1 + \xi \operatorname{cth} \beta}{\xi + \operatorname{cth} \beta} \\ \xi &= \frac{k_2}{E_p A_p b}, k_2 = \frac{4r_0 G_b}{\eta(1-\mu)} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

另外, 附加应力的计算是影响该层变形的关键。在该层顶面, 即 $z = l_c$ 处的附加应力, 可以通过 Boussinesq 解得到。地基中深度大于 l_c 处的附加应力, 按照土体内部作用均布荷载时的 Mindlin 解求得。

该层变形量表达式为

$$s_{12} = \frac{p_{lc} + p_1}{2E_c} (l - l_c) \quad (17)$$

式中: p_{lc} 为 $z = l_c$ 深度处的附加应力, 通过 Boussinesq 解计算得到; p_1 为 $z = l$ 深度处的附加应力, 按作用在 $z = l_c$ 深度处矩形均布荷载 (荷载为 p_{lc}) 作用下的 Mindlin 解求得; E_c 为桩-土复合模量。

3.3 下卧层沉降计算方法

下卧层的变形计算仍采用分层总和法, 竖向附加应力的分布按作用在 $z = l_c$ 深度处的矩形均布荷载由 Mindlin 解求得。下卧层的变形计算表达式为

$$s_2 = \sum_{i=1}^n \frac{p_i + p_{i-1}}{2E_{si}} l_i \quad (18)$$

这样, 整个柔性桩复合地基的变形量可由下式计算

$$S = S_{11} + S_{12} + S_2 \quad (19)$$

4 工程实例分析

上海某多层住宅校区, 采用粉体喷射搅拌法加固地基, 设计桩长为 14.0 m, 采用柱状加固, 桩径为 500 mm, 面积置换率为 15 %, 加固面积为 74 m × 16 m, 设计复合地基容许承载力为 140 kPa。场地的土层分布及各层土的有关指标见表 1。

表 1 场地的土层分布及各层土的有关指标
Table 1 Soil distributions and related indexes

层号	土层名称	层厚/m	重度/kN·m ⁻³	E_s /MPa
1	褐黄色粉质黏土	2.5	18.6	3.68
4	灰色淤泥质粉质黏土	5.5	18.0	2.94
5	灰色淤泥质黏土	9.5	17.2	1.93
7	灰色淤泥质粉质黏土	6.0	18.1	4.01
8	灰色粉质黏土	10.0	18.4	5.09

按照本文所述的分层计算法进行沉降计算, 计算时桩体应力集中系数 $\mu_p = 2.75$, 桩体变形模量 $E_p = 110$ MPa。由式 (11) 算得有效桩长 $l_e = 6.6$ m, 由式 (15) 算得第 2 层的桩土复合模量为 27.8 MPa。表 2 为本文方法计算结果与其他方法比较, 可以看出, 本文方法与实测结果最为接近。

表 2 复合地基沉降计算结果对比
Table 2 The results of settlement of composite foundation

计算方法	沉降值		
	加固层压缩量/cm	下卧层压缩量/cm	总沉降/cm
分层总和法	9.33	30.2	39.53
双层地基法	7.5	21.1	28.6
有限元计算法	/	/	19.52
三层地基法(秦建庆 ^[6])	2.4+2.9	9.8	15.1
本文方法	0.9+1.0	10.8	12.7
实测沉降值	/	/	10.2

5 结 论

试验研究和理论分析表明, 柔性桩存在有效桩长, 但是人们对有效桩长的认识还不一致。对于有效桩长, 可以从承载力的角度来理解, 也可以从沉

降的角度来理解, 但是其概念和数值大小是不同的。另外, 单桩和群桩的有效桩长也不一样。本文在分析中考虑了有效桩长的概念, 将柔性桩复合地基压缩层分为地面至有效桩长、有效桩长至下卧层顶端及下卧层 3 层, 并假定柔性桩的桩侧阻力为三角形分布, 对不同范围采用不同计算方法, 求得柔性桩复合地基的沉降值。该方法更符合柔性桩复合地基荷载传递机制, 计算所得的结果也与实测结果最为接近。

研究表明, 在基础的长宽比一定的情况下, 按 Boussinesq 公式和 Mindlin 公式计算变形时存在基础埋深界限。当基础埋深在这个界限以内时, 用两种公式计算得到的沉降值相差较小, 当基础埋深超过这个界限值后, 两种求解公式所得沉降相对差值较大。根据两种公式假设条件的不同, 地基内土体应力采用 Mindlin 公式计算更合理。本文也将 Mindlin 公式应用到有效桩长以下部分地基变形的求解中, 结果与实测较吻合。

参 考 文 献

- [1] 顾尧章, 周焕桥. 水泥搅拌桩承载力与临界桩长[J]. 浙江建筑, 1992, (2): 10—13.
- [2] 陈善雄. 柔性桩荷载传递特性与有效桩长分析[J]. 岩土工程师, 1995, 7 (3): 1—8.
- [3] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16 (4): 1—8.
- [4] 舒翔, 王福忠. 确定柔性桩复合地基有效桩长的简化方法[J]. 工业建筑, 2001, 31 (11): 16—17.
- [5] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1990.
- [6] 秦建庆, 叶观宝. Mindlin 解在水泥土桩复合地基变形计算中的应用[J]. 岩土工程技术, 2000, (1): 17—20.
- [7] 孙林娜, 龚晓南. 考虑桩长与端阻效应影响的复合地基模量计算[C]. 中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集. [S. l.]: [s. n.], 2007.