

文章编号:1671-6833(2008)02-0023-04

柔性基础下复合地基有效桩长计算方法研究

杨明^{1,2}, 张可能¹, 刘杰³

(1. 中南大学 地学与环境工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 广州市南沙区建设工程质量安全监督站, 广东广州 511455; 3. 湖南工业大学 岩土工程研究所, 湖南株洲 412008)

摘要: 采用 Boussinesq 和 Geddes 解的联合求解方法, 得到了考虑复合地基中桩顶和桩间土顶荷载时复合地基中任意深度处附加应力的分布情况; 并根据柔性桩、桩间土和复合地基沉降关系, 得到了带垫层柔性桩复合地基有效桩长计算方法. 试验和计算结果对比表明: 由于考虑了桩间土顶压力、桩身刺入量变形等因素对复合地基有效桩长的影响, 有效桩长计算结果同现场实际情况比较吻合.

关键词: 复合地基; 有效桩长; 柔性基础

中图分类号: TU 473 **文献标识码:** A

0 引言

根据研究发现, 深厚软土地基中柔性桩复合地基存在有效桩长^[1-3]. 当桩长超过有效桩长时, 增加桩长对提高单桩承载力作用有限. 对带垫层柔性桩复合地基有效桩长的计算方法还未见报道. 采用传统 Boussinesq 附加应力方法的计算结果与实际测量值有较大差异, 其原因在于传统方法忽略了桩顶荷载对附加应力的贡献. 针对这个问题, 国内有学者^[4-5]用 Boussinesq 和 Mindlin 解联合求解柔性桩复合地基中附加应力的分布, 并取得了一些成果. Geddes^[6]在 Mindlin 解的基础上, 推导出了通过桩顶荷载直接求解附加应力的应力系数公式, 使计算桩顶荷载引起的附加应力方法变得更为简单. 笔者采用 Boussinesq 和 Geddes 解的联合方法, 计算出考虑桩间土顶压力情况下复合地基中附加应力的分布, 并根据柔性桩、桩间土和复合地基沉降关系, 对带垫层柔性桩复合地基有效桩长计算方法进行研究.

1 复合地基中附加应力计算

对于复合地基中任意点的附加应力计算可以通过 2 部分叠加得到: 一部分是桩顶荷载作用引起的附加应力, 可以采用 Geddes 方法求解; 另一部分则由桩间土顶荷载作用引起, 可以采用半无

限空间下 Boussinesq 的应力解.

1.1 桩顶荷载引起的附加应力

文献[6]认为, 桩顶集中荷载对桩侧土体中产生的附加应力可以分解为 3 部分作用力在土体中产生的附加应力进行叠加. 这 3 部分力分别是桩端集中荷载、桩侧矩形分布荷载和桩侧三角形分布荷载, 如图 1 所示. Geddes 在 Mindlin 应力解的基础上, 推导出了 3 种荷载条件下的附加应力分布的系数公式, 其中矩形和三角形附加应力分布的系数公式如下^[6]:

$$I_r = 1/8\pi(1-\mu) \{ -2(2-\mu)/A + [2(2-\mu) + 2(1-2\mu)(m/n)(m/n+1/n)]/B + n^2/A^3 + [4m(1+\mu)(m+1)(m/n+1/n)^2 - (4m^2+n^2)]/B^3 + [4m^2-4(1+\mu)(m/n)2m^2]/F^3 - [2(1-2\mu)(m/2)^2]F + 6m^2n^2/B^5 - 6m(1/n)^2(m+1)^5/B^5 + 6m^2[(m^4-n^4)/n^2]/F^5 \}$$

$$I_t = 1/[4\pi(1-\mu)] \{ -2(2-\mu)/A + [2(2-\mu) + (4m+1) - 2(1-2\mu)(m/n)^2(m+1)]/B + [mn^2 + (m-1)^3]/A^3 + [(m+1)^3 + 4m\mu n^2 + 4m^3 - 15mn^2 - 2(5+2\mu)(m/n)^2(m+1)^2]/B^3 + [2(1-2\mu)m^3/n^2 - 8(2-\mu)m]/F + [2(7-2\mu)mn^2 - 6m^3 + 2(5+2\mu)(m/n)2m^3]/F^3 + [6mn^2(n^2-m^2) + 12(m/n)^2(m+1)^5]/B^5 + [12(m/n)^2m^5 - 6mn^2(m^2-n^2)]/F^5 \}$$

收稿日期:2008-03-26; 修订日期:2008-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578169)

作者简介:杨明(1972-),男,湖南邵阳人,中南大学博士研究生,主要从事地基处理、地质灾害治理、基坑支护结构等研究. E-mail: yangming_csu@126.com

$$F^5 + 2(2 - \mu) \ln((A + m - 1)/(F + m) \times (B + m + 1)/(F + m)) \quad (2)$$

式中: $F = \sqrt{m^2 + n^2}$; $B = \sqrt{n^2 + (m + 1)^2}$; $n = r/l$; $m = z/l$; μ 为泊松比; r 为 M 点至桩中心距离; l 为桩总长。

文献[7]的研究结果表明,深厚软土中柔性桩是典型的摩擦桩,桩侧摩阻力在桩身所承担的荷载中占很大比例。最大的侧摩阻力在桩顶下一定深度处达到最大,桩侧摩阻力分布如图2所示^[8]。为了能够利用 Geddes 推导的应力系数公式计算附加应力,对图2中桩侧摩阻力进行如图3所示的分解,并利用公式(1)和公式(2)进行附加应力计算,最后根据叠加原理进行叠加即得到桩长大于有效桩长时,桩顶荷载在复合地基中引起的附加应力。

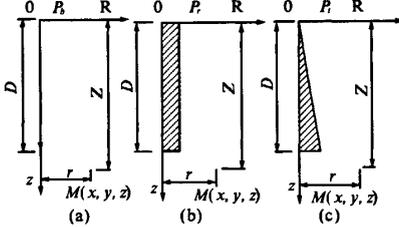


图1 桩顶荷载分解图

Fig.1 Division of load on pile

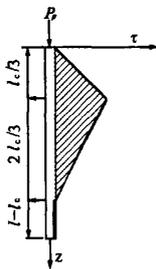


图2 桩侧摩阻力分布图

Fig.2 Distribution of load beside pile

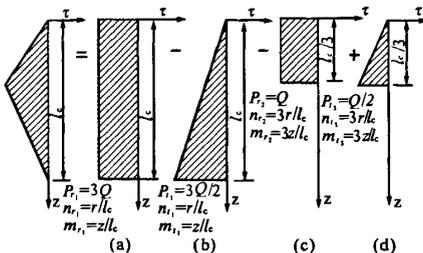


图3 桩侧阻力分解图

Fig.3 Division of load beside pile

1.2 桩间土顶荷载引起的附加应力

桩间土顶荷载产生的附加应力通常采用弹性

力学中半无限空间下 Boussinesq 的应力解。为了方便计算,可以把桩间土顶应力 P_0 分解为图4所示。在计算桩间土顶应力 P_0 产生的附加应力时,可以通过先补全桩截面处 P_0 的方法,然后再减去桩截面处 P_0 的方法进行应力叠加。

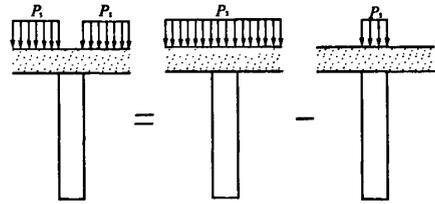


图4 桩间土顶压力分解图

Fig.4 Division of pressure on soil among piles

2 桩顶沉降量计算

假设柔性桩在上部荷载作用下仅发生弹性变形,那么桩顶沉降量 s_p 可以认为由两部分组成,一部分为柔性桩桩身的压缩变形 s_{p1} ,另一部分则为桩端土压缩变形之和 s_{p2} 。

3.1 桩身压缩量

根据假设,可以容易得到任意深度 z 处桩侧摩阻力 $\tau(z)$ 与桩顶荷载 p_p 的关系如下:

$$\begin{cases} \tau_1(z) = (P_p A_p / \pi r_0 l_c) \cdot (3z/l_c), & 0 \leq z \leq l_c/3 \\ \tau_2(z) = 3P_p A_p / 2\pi r_0 l_c (1 - 3z/l_c), & l_c/3 < z \leq l_c \end{cases} \quad (3)$$

根据图2,当桩身受平衡力时,可以得到摩阻力桩身轴力的分布:

$$\begin{cases} p_1(z) = P_p A_p (1 - 3z^2/l_c^2), & 0 \leq z \leq l_c/3 \\ p_2(z) = 3P_p A_p / 2(1 - z/l_c)^2, & l_c/3 < z \leq l_c \end{cases} \quad (4)$$

当 $l \geq l_c$ 时桩身变形量由2部分组成,一部分是有效桩长范围内桩身受桩顶荷载作用产生的变形量 s_{p1} ,另一部分是超出有效桩长部分桩身在附加应力作用下产生的变形量 s_{p2} ,分别采用下面的公式求解:

$$s_{p1} = \int_0^{l_c} (p(z)/E_p A_p) \cdot dz = \int_0^{l_c/3} (p_1(z)/E_p A_p) \cdot dz + \int_{l_c/3}^{l_c} (p_2(z)/E_p A_p) \cdot dz = 4P_p l_c / 9E_p \quad (5)$$

$$\begin{cases} s_{p2} = \sum_{i=1}^{r_1} (\sigma_i / E_p) \Delta h_i \\ \sum_{i=1}^{r_1} \Delta h_i = l - l_c \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_p 为桩身弹性模量; A_p 为桩身截面积; p_p 为桩顶应力; r_0 为桩身半径; l 为桩总长; l_c 为有效

桩长。

3.2 桩端土变形量

根据有效桩长的概念可知,当桩长大于有效桩长时,超过有效桩长的桩身不受桩顶荷载的影响,而只受复合地基中附加应力的影响,因此,桩端土压缩量 s_{p3} 完全由复合地基中附加应力引起,可以采用分层沉降计算方法计算。

$$\begin{cases} s_{p3} = \sum_{j=1}^2 (\sigma_s/E_s) \Delta h_j \\ \sum_{j=1}^2 \Delta h_j = h - L \end{cases} \quad (7)$$

2.3 桩顶总沉降量

由于桩顶沉降量 s_p 由两部分叠加所得,即:

$$s_p = s_{p1} + s_{p2} + s_{p3} = 4p_p l_c / 9E_p + \sum_{i=1}^1 \sigma_s / E_p \Delta h_i + \sum_{j=1}^2 \sigma_s / E_s \Delta h_j \quad (8)$$

若桩长为有效桩长 l_c ,则上式可以简化为

$$s_p = s_{p1} + s_{p3} = 4p_p l_c / 9E_p + \sum_{i=1}^2 \sigma_s / E_s \Delta h_i \quad (9)$$

3 桩间土顶沉降量计算

通过联合 Geddes 应力解和 Boussinesq 应力解,并假定桩侧摩阻力的分布形式方法,可以求出复合地基内任意点处的附加应力 $\sigma_s(z)$ 。根据土体单向压缩的假定,可以求得桩间土顶的压缩量:

$$\begin{cases} s_s = \sum_{k=1}^3 \sigma_s / E_s \Delta h_k \\ \sum_{k=1}^3 \Delta h_k = h \end{cases} \quad (10)$$

式中: Δh_i 为有效桩长范围内桩身第 i 个桩单元高度; Δh_j 为超过有效桩长段第 j 层桩单元高度; Δh_k 为桩端以下第 k 层土单元厚度; σ_s 为复合地基任一点附加应力大小; h 为桩间土顶到附加应力计算深度。

4 柔性基础下有效桩长计算公式推导

由于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。在深厚软土中,桩长很难穿透软土层,并且软土的厚度大于有效桩长。在有效桩长深度位置,桩端沉降量同该深度处桩间土沉降量基本一致,可以把桩身下刺量近似为零。因此在深厚软土中,柔性桩复合地基在柔性基础下只发生向上的刺入变形。由于柔性基础下复合地基有刺入变形的发生,因此桩土顶的沉降量不再相等,而是存在一个刺入变形的差值,如图5所示,因此存在关系式(11),公式中

s_p 、 s_s 和 s_c 分别代表桩顶沉降量、桩间土顶沉降量和桩身向上刺入量:

$$s_p = s_s - s_c \quad (11)$$

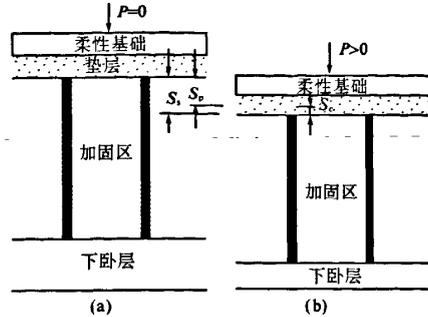


图5 柔性基础下复合地基变形简图

Fig.5 Displacement of composite foundation under flexible foundation

假定厚度 h_c 的垫层为弹性体,弹性模量为 E_c ,那么,桩顶和桩间土顶位移之间的关系可以用下式来表示:

$$s_p - s_s = (p_p - p_s) h_c / E_c \quad (12)$$

分别把式(9)和式(10)代入式(12),并且桩长大于有效桩长,那么就可以得到柔性基础下考虑桩间土顶压力情况下的复合地基有效桩长计算公式为

$$4p_p l_c / 9E_p + \sum_{j=1}^2 (\sigma_s / E_s) \Delta h_j - \sum_{k=1}^3 (\sigma_s / E_s) \Delta h_k = (p_p - p_s / E_c) h_c \quad (13)$$

由于式(13)的求解过程比较复杂,难以得到解析解,因此可以通过逆解法来求解。首先通过给定上部荷载、桩土应力比、置换率、土层厚度 H 、 E_s 和 μ_s 、桩体 E_p 和 A_p ,并假定有效桩长 l_c 的长度,利用 Boussinesq 和 Geddes 应力解求得桩土接触面处沿深度方向的附加应力以及有效桩长以下沿深度方向的附加应力值,然后带入公式(12)计算公式左边和右边的值,如果公式两边计算值相等,这时假定的桩长就是复合地基在给定条件下的有效桩长。通过改变上部荷载、桩土应力比、置换率、土层 E_s 和 μ_s 、桩体 E_p 和 A_p 的值,可以研究上述因素对有效桩长的影响。

5 试验对比分析

为了验证理论公式的适用性,课题组在广州南沙地区进行了水泥掺量为 12%、14%、16% 和 18% 的搅拌桩复合地基现场试验,试验桩均采用桩长 15 m,桩径为 0.5 m 的水泥土搅拌桩,并在桩身埋设自制的应变计,如图6所示。

试验时在桩顶铺设 20 cm 的粗砂垫层,通过取样室内试验得到不同水泥土桩桩身弹性模量 E_p , 分别为 45.8、57.6、68.5、83.3 MPa, 桩间土弹性模量 E_s 为 2.7 MPa, 泊松比 μ 为 0.45. 图 7 为水泥土搅拌桩复合地基有效桩长试验结果同计算结果曲线. 在现场实测搅拌桩复合地基的有效桩长确定时, 取桩身应力为桩顶应力的 10% 处为复合地基有效桩长^[7]. 从图中可以看出, 随着水泥掺量的提高, 水泥土桩刚度逐渐增大, 计算结果比实测结果略有偏大, 分别偏大 6.62%、10.12%、11.21% 和 12.25%, 偏大的原因是笔者有效桩长计算方法推导过程中把垫层当做弹性材料来考虑, 使得桩顶向垫层的刺入量偏大, 从而导致计算结果比实际测量结果偏大.

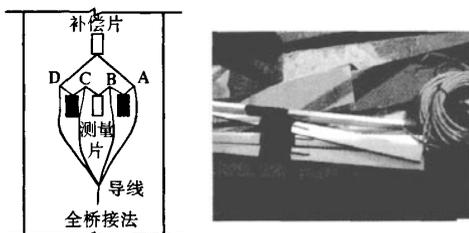


图 6 应力计示意图

Fig. 6 Figure of instrument

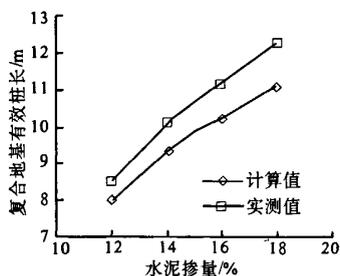


图 7 复合地基有效桩长

Fig. 7 Effective pile length of composite foundation

6 结论

(1) 采用 Boussinesq 和 Geddes 解的联合求解方法, 得到考虑复合地基中桩顶和桩间土顶荷载时复合地基中任意深度处附加应力的求解方法.

(2) 根据柔性桩、桩间土和复合地基沉降关系, 对带垫层柔性桩复合地基有效桩长计算方法进行研究.

(3) 得到的带垫层柔性桩复合地基有效桩长计算方法, 考虑了桩间土顶压力、桩身刺入量变形等因素对复合地基有效桩长的影响, 计算结果同现场实际测量结果比较吻合.

参考文献:

- [1] 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): 16-18.
- [2] 曾友金, 章为民. 水泥搅拌桩有效桩长的确定[J]. 水利水电工程学报, 2002, (3): 14-20.
- [3] 张忠坤, 殷宗泽, 曹正康. 复合地基临界桩长的研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 185-188.
- [4] 张小平, 俞仲泉. 用 Mindlin 解推求复合地基中附加应力的计算公式[J]. 河海大学学报, 1999, 27(2): 35-39.
- [5] 闫宝杰, 宋修广, 岳跃群. 粉喷桩复合地基附加应力的 Boussinesq - Mindlin 联合解法[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1255-1258.
- [6] GEDDES J D. Stresses in foundation soils due to vertical subsurface load[J]. Geotechnique, 1966, 16(3): 231-255.
- [7] 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.
- [8] 齐伟军, 杨海涛, 赵艳秋. 复合地基有效桩长的计算方法[J]. 黑龙江科技学院学报, 2003, 16(4): 50-52.

Study on Effective Pile Length of Composite Foundation under Flexible Foundation

YANG Ming^{1,2}, ZHANG Ke-neng¹, LIU Jie³

(1. Department of Geosciences and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Guangzhou - Nansha Construction Quality & Safety Supervision Station, Guangzhou 511455, China; 3. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: Based on the Geddes and Boussinesq stress solutions and thinking of loads on the surface of pile and soil, the distribution of additional stress in any place of composite foundation is found in paper. Furthermore, based on the displacement relationship among pile, soil and composite foundation, a formula for calculating effective length of flexible pile composite foundation with cushion has been got. Calculation results of this method are very consistent with those measured in the site.

Key words: composite foundation; effective length; flexible foundation