

路堤荷载下柔性悬桩复合地基的沉降分析^{*}

Settlement analysis of composite ground improved by flexible floating piles under road embankment

杨 涛

(上海理工大学 城建学院, 上海 200093)

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2000) 06- 0741- 03

作者简介: 杨 涛, 男, 1962年生, 高级工程师, 博士。主要从事软土地基处理、岩土工程数值模拟等研究工作。

1 前 言^{*}

在软土地基上修建高速公路, 沉降问题比稳定性问题更为重要。由于以桩体作为竖向增强体的复合地基加固技术在减小沉降、适应快速加荷从而缩短工期, 特别是解决桥头跳车方面较为有效, 因而近年来在公路建设中得到了广泛应用, 工程设计中如何进行路堤荷载下复合地基的沉降分析已经引起工程界和学术界的关注。现有的沉降计算理论^[1]大都采用了桩土“等应变”假设, 只适合于刚性基础下复合地基的沉降分析。Alamgir 等人选择适当的变形模式, 获得了柔性基础下端承桩复合地基沉降计算的解析式^[2]。对于柔性基础下悬桩复合地基的沉降计算, 国内外未见有研究成果报道。本文在 Alamgir 等人工作的基础上, 建立了柔性基础下悬桩复合地基加固区压缩量的解析计算式; 基于加固前后下卧层附加应力和沉降的有限元模拟对比分析和模型试验成果, 提出了下卧层压缩量的计算方法。

2 复合地基沉降分析

柔性基础下的悬桩复合地基受到大面积分布荷载 p 的作用, 桩的直径 $d = 2a$, 桩长 L , 单桩加固范围直径 $d_c = 2b$ 。取一根内桩和其所加固范围土体组成的典型单元体进行分析。将桩划分为 $M1$ 个单元, 单元厚度 $\Delta H = L/M1$; 桩间土划分为 $M1 \times N$ 个环单元, 其厚度与桩单元相同, 径向宽度 $\Delta r = (b - a)/N$, 如图 1 所示。

2.1 典型单元体的变形模式

现场沉降观测^[3]表明, 在路堤荷载作用下, 悬桩复合地基桩顶沉降小于桩间土, 桩端沉降大于桩间土, 显然桩侧出现了负摩阻力并有中性点存在。柔性基础下悬桩复合地基的荷载传递机理与端承桩复合地基是不同的, 后者桩侧摩阻力沿桩长都是负值, 并没有中性点存在。因此, 在分析柔性基础下悬桩复合地基

加固区压缩量时, 必须对 Alamgir 等人针对端承桩复合地基提出的典型单元体变形模式加以修正。在分析典型单元体时, 假定:

- (1) 桩和土都是线弹性体, 弹性模量分别为 E_c 和 E_s , 泊松比分别为 μ_c 和 μ_s 。
- (2) 桩侧摩阻力沿桩长直线分布。
- (3) 桩土界面处位移相等, 不产生相对滑移。
- (4) 桩土只发生竖向压缩, 径向变形忽略不计。

本文采用的典型单元体变形模式见式(1)所示, w_{cz} 为深度 z 处桩单元的压缩量, w_{rz} 为深度 z 距桩中心径向距离 r 处土单元的压缩量, z_m 为中性点深度, α_c 和 β_c 为待定参数。

$$w_{rz} = w_{cz} + \alpha_c \left(\frac{r}{a} - e^{\beta_c \left(\frac{r}{a} - 1 \right)} \right) (1 - z/z_m) \quad (1)$$

$$(a \leq r \leq b, 0 \leq z \leq L)$$

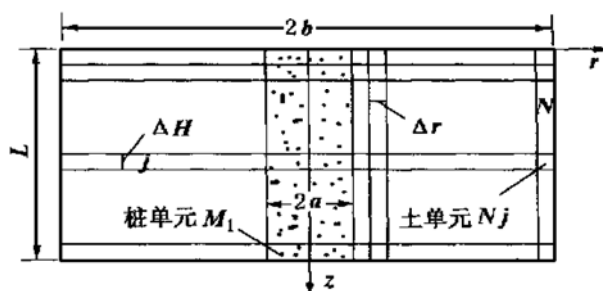


图 1 典型单元体的离散

Fig. 1 Discretization of composite element

2.2 加固区桩身压缩量 S_c 和桩间土压缩量 S_1 的计算

作用于第 j 个桩单元和典型单元体侧边界上第 Nj 个土单元上的应力如图 2 所示。

根据弹性力学轴对称问题本构方程和桩、土单元竖向力的平衡条件, 可以得到如下的应力和变形计算式:

(1) 桩间土剪应力 τ_z 与桩侧剪应力 τ_{az}

$$\tau_z = \frac{E_s \alpha_c}{2a(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) (1 - \beta_c e^{\beta_c (\frac{z}{a} - 1)}) \quad (2)$$

$$\tau_{az} = \frac{E_s \alpha_c}{2a(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) (1 - \beta_c) \quad (3)$$

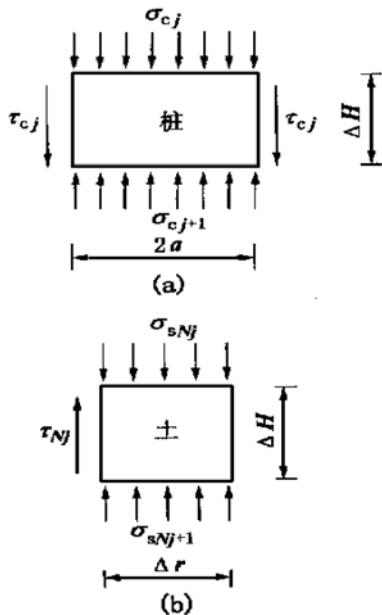


图2 桩、土单元上的应力

Fig. 2 Stresses on pile element and soil element

(2) 桩单元 j 底面正应力 σ_{cj+1} 及压缩量 w_{cj}

$$\sigma_{cj+1} = \sigma_{cj} + \frac{(\Delta H/a)(1 - \beta_c) E_s \alpha_c}{a(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) \quad (4)$$

$$w_{cj} = \frac{\Delta H}{E_c} \sigma_{cj} + \frac{(\Delta H/a)^2 (1 - \beta_c) E_s \alpha_c}{2E_c(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) \quad (5)$$

(3) 土单元 Nj 底面正应力 σ_{sNj+1} 及压缩量 w_{sNj}

$$\sigma_{sNj+1} = \sigma_{sNj} - \frac{(\Delta H/a)(n_2 - \Delta R/2)}{2a \Delta R (n_2 - \Delta R/2)} \rightarrow \leftarrow \frac{(1 - \beta_c e^{\beta_c (n_2 - \Delta R/2 - 1)}) E_s \alpha_c}{(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) \quad (6)$$

$$w_{sNj} = \frac{\Delta H}{E_s} \sigma_{sNj} - \frac{(\Delta H/a)^2 (n_2 - \Delta R/2)}{4 \Delta R (n_2 - \Delta R/2)} \rightarrow \leftarrow \frac{(1 - \beta_c e^{\beta_c (n_2 - \Delta R/2 - 1)}) \alpha_c}{(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) \quad (7)$$

式中 $\Delta R = \Delta r/a$; $n_2 = b/a$ 。

由式(4)~(7)按从顶层单元到底层单元的顺序,可计算出各桩单元和典型单元体侧边界各土单元压缩量。桩的压缩量 S_c 与桩间土的压缩量 S_1 按式(8), (9)计算:

$$S_c = \sum_{j=1}^{M1} w_{cj} \quad (8)$$

$$S_1 = \sum_{j=1}^{M1} w_{sNj} \quad (9)$$

2.3 α_c 、 β_c 和 z_m 的确定

(1) β_c 的确定

根据对称性, 典型单元体侧边界处剪应力为零, 由式(2), 有

$$\beta_c e^{\beta_c (n_2 - 1)} - 1 = 0 \quad (10)$$

式(10)表明 β_c 只与 b/a 有关, 求解方程(10)可获得 β_c 值。

(2) α_c 的确定

式(1)给出的典型单元体变形模式建立了桩单元与土单元之间变形协调关系, 将式(5), (7)代入式(1), 可获得 α_c :

$$\alpha_c = \frac{\frac{\sigma_{sNj}}{E_s} - \frac{\sigma_{cj}}{E_c}}{A_1 + A_2 + A_3} \Delta H \quad (11)$$

式中 $A_i (i = 1 \sim 3)$ 如下:

$$A_1 = \frac{(\Delta H/a)^2 (1 - \beta_c) E_s}{2E_c(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{(\Delta H/a)^2 (n_2 - \Delta R/2)}{4 \Delta R (n_2 - \Delta R/2)} \rightarrow \leftarrow \frac{(1 - \beta_c e^{\beta_c (n_2 - \Delta R/2 - 1)})}{(1 + \mu_s)} (1 - z/z_m) \quad (13)$$

$$A_3 = (n_2 - \Delta R/2 - e^{\beta_c (n_2 - \Delta R/2 - 1)}) (1 - z/z_m) \quad (14)$$

由于路堤能够适应复合地基的变形, 属于柔性基础, 可以认为路堤荷载下加固区表面处于“自由应变”状态, 当 $z = 0$ 时 $\sigma_{sN1} = \sigma_{c1} = p$, A_1 , A_2 和 A_3 成为已知常数, 代入式(11)可得到 α_c 。

(3) z_m 的确定

柔性基础下悬桩复合地基在荷载作用下桩侧会出现中性点, 它是负摩阻力与正摩阻力的转换点。中性点的深度 z_m 与桩和土的性质以及荷载大小等因素有关。Poorooshasb 等人的研究发现, 荷载大小对中性点位置影响很小, 可以忽略; 地基土成层分布时, 桩端土刚度对中性点位置影响较大^[4]。实际设计中 z_m 可按表1近似计算^[5]。

表1 中性点深度 z_m

Table 1 Neutral depth z_m

桩端土 层性质	粘性土 粉土	中密 以上砂	砾石、 卵石
$\frac{z_m}{L}$	0.5~0.6	0.7~0.8	0.9

2.4 下卧层压缩量 S_2 的计算

要准确地计算下卧层的压缩量, 首先必须正确地把握下卧层中的附加应力场和位移场的分布规律。现场和室内模型试验^[6,7]发现, 复合地基下卧层的沉降比相应的天然地基大, 这是由于桩将所分担的一部分荷

载向下卧层传递,使下卧层中的附加应力大于相应的天然地基的缘故。三维有限元模拟分析^[3]表明,桩间下卧土层的附加应力分布呈现两个不同的阶段:在上部厚度较小的土层内,附加应力数值从小于相应的天然地基开始逐渐增加直至稍大于天然地基;余下的下卧层土的附加应力分布与相应的天然地基基本一致。只是数值略大一点,不过增加幅值很小。文献^[3]还发现,在工程上采用的置换率范围内,下卧层压缩量几乎不受桩土模量比和置换率的影响。从上述下卧层附加应力和位移分布特性可见,复合地基与双层地基完全不同,下卧层压缩量不宜采用双层地基模型计算。本文建议采用式(15)计算下卧层压缩量:

$$S_2 = \lambda S_{20} \quad (15)$$

式中 S_{20} 为相应天然地基下卧层范围的压缩量,可采用分层总和法计算; λ 为扩大系数,根据有限元分析^[3]和模型试验成果^[7,8],设计时可取 1.03。

3 工程实例

宁通一级公路(南通段)引河大桥桥头和过渡段软土较厚,采用二灰土桩加固。二灰土桩的配比为生石灰:粉煤灰:土=1:4.5:4.5,桩长 $L=6$ m,直径 $d=0.55$ m,呈三角形布置,间距和排距都为 2 m。地基土分为 4 层,第一层为亚粘土,平均厚度 2.9 m;第二层为淤泥质亚粘土,平均厚度 10.1 m;第三层为粉砂与亚粘土互层,平均厚度 15.4 m;第四层为亚粘土夹亚砂土。各土层压缩模量分别为 5.657, 2.840, 12.681, 6.170 MPa。现场载荷试验测得天然地基极限承载力为 63 kPa,成桩 11 个月后二灰土桩复合地基极限承载力为 268 kPa。试验断面 K102+990 处路堤高 4.76 m,容重 $\gamma=19$ kN/m³,路基顶宽 24.5 m,边坡 1:2。采用本文方法计算时,设 $\mu_c=0.2$, $\mu_s=0.3$,则加固区土的弹性模量按其压缩模量的 0.74 倍估算,桩的弹性模量按现场试样 164 天龄期压缩模量的 0.9 倍估算, $E_c=33882.7$ kPa, $M_1=N=20$ 。计算结果见表 2 所示,为便于比较,表 2 中也列出了复合模量法、复合本构有限元法^[3]的计算结果和现场实测值。

表 2 表明,采用本文方法计算的桩身压缩量为 4.1cm;加固区和下卧层压缩量分别为 12.5cm 和 33.4cm。与实测结果基本一致。而目前设计中普遍采用的复合模量法获得的加固区压缩量数值偏小。

表 2 K102+990 断面沉降计算值与实测值的比较

计算方法	S_c /cm	S_1 /cm	S_2 /cm	S /cm
复合模量法	—	9.8	32.4	42.2
FEM	—	13.1	37.7	50.8
本文方法	4.1	12.5	33.4	45.9
实测结果	—	15.7	33.0	48.7

4 结 论

(1) 本文基于修正的 Alamgir 典型单元体变形模式,给出了路堤荷载下复合地基加固区压缩量计算的解析式。工程实例表明,其精度较之复合模量法要高。复合模量法计算结果偏小,误差随着置换率和桩土模量比的提高而增大。

(2) 与天然地基相比,复合地基加固区的存在并不会减小下卧层的压缩量,但提高幅度非常小,计算时可不考虑加固区存在的影响。基于双层地基理论的各种计算方法获得的下卧层压缩量数值偏小,误差随桩土模量比和置换率的提高而增大。

本研究工作得到了上海理工大学博士科研基金资助,特此致谢。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
- [2] Alamgir M, Miura N, Poorooshasb H B, Madhav M R. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(4): 267~290.
- [3] 杨 涛. 复合地基沉降计算理论、位移反分析模型和二灰土桩软基加固试验研究[D]. 南京: 河海大学, 1997.
- [4] Poorooshasb H B, Alamgir M, Miura N. Negative skin friction on rigid and deformable piles[J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(2): 109~126.
- [5] 张季荣, 朱向荣. 简明建筑基础计算与设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] Ekstrom J C, Berntsson J A, Sallfors G B. Test fills of clays stabilized with cement columns[A]. Proc. VIII ICSMFE, Vol 3[C]. 1994. 1183~1186.
- [7] 阎明礼, 吴春林, 杨 军. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 55~62.
- [8] 阎明礼. 地基处理技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.