

文章编号:1674-2974(2016)05-0120-05

考虑鼓胀变形的散体材料桩复合地基沉降计算*

张玲[†], 赵明华

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对竖向荷载作用下靠近桩顶一定深度的范围内, 桩体不仅会发生竖向压缩变形且会发生侧向鼓胀变形特性, 基于荷载传递法, 导出了竖向荷载作用下散体材料桩复合地基中的某根单桩的桩身压缩量计算公式, 进而得到新的散体材料桩复合地基沉降计算公式. 分析时, 视散体材料桩为弹性均质体, 根据广义胡克定律得到其应力应变关系; 桩周土提供的侧向约束力为桩侧竖向力引起的侧向土压力, 并考虑加筋垫层的侧向约束作用及其沿深度的传递对桩体侧向约束的有利影响. 为验证本文方法的可行性, 对某一工程实例进行分析, 且与其它方法进行比较分析. 结果表明: 与常规计算方法相比, 本文方法从荷载传递规律出发, 可考虑鼓胀深度随桩顶竖向荷载的增加逐渐向深处发展的特点, 更符合散体材料桩复合地基的实际受力变形状况.

关键词:复合地基; 散体材料桩; 沉降; 荷载传递; 鼓胀变形

中图分类号:U416.1

文献标识码:A

Settlement Calculation of Granular Material Pile Composite Foundation with Consideration of Lateral Bulging

ZHANG Ling[†], ZHAO Ming-hua

(Geotechnical Engineering Institute, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The granular material pile has its own deformation characteristics under vertical loads. The granular material pile shows not only a vertical compressive deformation but also a radial expansion near the top of the pile. According to the study of this load transfer mechanism, a new equation was developed to calculate the compressive deformation of a single granular material pile. On the basis of this investigation way, a new method to predict the settlement of the composite foundation reinforced by granular material piles such as stone columns was developed. In the analysis model, the granular pile was treated as an elastic material satisfying Hooke's law, and the lateral confining support provided by the surrounding soil was assumed as lateral soil pressure. Further, the beneficial influence of the lateral restraint of the reinforced cushion as well as its development within depth on restricting the lateral bulging of the granular pile was taken into account. Finally, a case study was performed to validate the proposed method. The foundation settlements predicted by the proposed model were close to those of existing calculation methods. The prediction results indicate that the proposed method based on the load transfer mechanism is more practical

* 收稿日期: 2015-07-07

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA11Z104); 国家自然科学基金(青年基金)资助项目(51208191); 湖南大学青年教师成长计划资助项目

作者简介: 张玲(1982-), 女, 浙江临海人, 湖南大学助理教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: zhanglhd@163.com

because the proposed method can consider the variation law that the depth of lateral deformation of the pile increases with the increase of the vertical load acting on the top of the pile.

Key words: composite foundation; granular material pile; settlement; load transfer; lateral bulging

以碎石桩为代表的散体材料桩及其与桩间土形成的复合地基已广泛地应用于地基加固工程. 沉降计算是该复合地基设计理论的重要组成部分. 尤其是复合地基按沉降控制设计时, 沉降计算更为重要. 有关散体材料桩复合地基的沉降计算国内外学者提出了理论或经验计算公式. 其中较为常用的方法是采用复合模量法计算加固区的压缩量, 再采用分层总和法计算下卧层的压缩量, 进而得到整个复合地基的沉降量^[1-3]. 该方法的假定之一是竖向荷载作用下桩与桩间土之间无侧向挤压作用, 各自都不发生侧向变形^[4].

散体材料桩是依靠桩周土的侧限阻力约束其变形并承受荷载的. 荷载作用下, 靠近桩顶一定深度范围内, 桩体不仅发生竖向压缩变形且伴有侧向鼓胀变形^[5-6]. 因此散体材料桩复合地基沉降计算应考虑桩体鼓胀变形的影响. 邓修甫等^[7]、孙琳娜等^[8]将散体材料桩复合地基沉降视为桩体鼓胀段、非鼓胀段和下卧层 3 部分压缩量之和. 其中桩体鼓胀深度采用 Brauns 方法确定, 即鼓胀深度为桩体极限受荷状态下的鼓胀变形深度 $2r_p \tan(\pi/4 + \varphi_p/2)$ ^[6] (其中 r_p 为桩径, φ_p 为碎石的内摩擦角).

然而, 当桩体材料及桩周土条件不变时, 桩体鼓胀变形应随桩顶竖向荷载的增加而逐渐向深处发展. 故本文从散体材料桩的荷载传递机理出发, 考虑鼓胀变形随荷载变化, 提出一种计算散体材料桩桩身压缩量的新方法, 进而获得散体材料桩复合地基的沉降量.

1 复合地基沉降计算新方法

1.1 桩、土受力变形分析

取散体材料桩复合地基中的某根单桩进行分析, 桩顶作用荷载 q_p , 桩间土作用荷载 q_s , $q_s = q_p/n$, 其中 n 为桩土应力比. 对于散体材料桩复合地基, 在无测试资料时, 对黏性土可取 2~4, 粉土和砂土 n 可取 1.5~3.0. 原地基土强度低者取大值, 反之取小值^[6]. 若复合地基上作用荷载为 q , 则 $q_p =$

$\frac{n}{1 + (n - 1)m} q$, m 为复合地基置换率. 为便于分析, 沿桩长将桩划分为 N 段 (图 1). 并取其中第 i 段进行分析 (图 2).

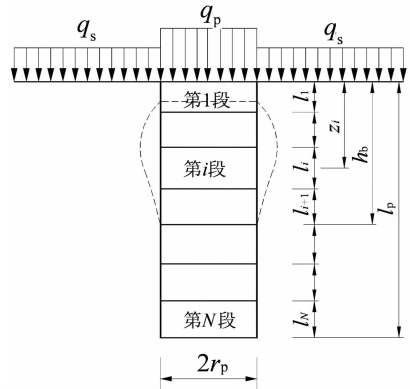


图 1 散体材料桩分析单元的划分
Fig. 1 Segment of pile

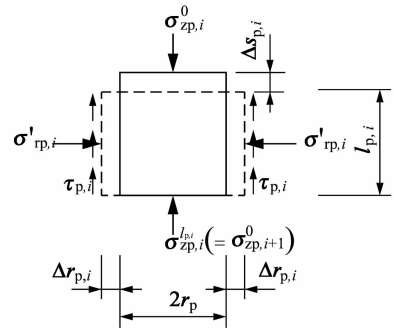


图 2 第 i 段桩体的应力应变关系图
Fig. 2 Stress-strain relationship of i -th segment of pile

设散体材料桩为弹性均质体, 根据广义胡克定律, 第 i 桩单元段的应力应变关系可表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{zp,i} = \frac{E_p}{1 + \mu_p} \left[\frac{\mu_p}{1 - 2\mu_p} (2\epsilon_{r,i} + \epsilon_{z,i}) + \epsilon_{z,i} \right], \\ \sigma_{rp,i} = \frac{E_p}{1 + \mu_p} \left[\frac{\mu_p}{1 - 2\mu_p} (2\epsilon_{r,i} + \epsilon_{z,i}) + \epsilon_{r,i} \right]. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{zp,i}$, $\sigma_{rp,i}$ 分别为第 i 桩单元的竖向应力与径向应力; $\epsilon_{z,i}$, $\epsilon_{r,i}$ 为第 i 桩单元的竖向与径向应变; E_p , μ_p 分别为桩体弹性模量和泊松比.

若令 $-\frac{\epsilon_{r,i}}{\epsilon_{z,i}} = k_i$, 则式(1)可转化为:

$$\begin{cases} \sigma_{zp,i} = \frac{E_p}{1-\mu_p-2\mu_p^2} [2\mu_p - \frac{(1-\mu_p)}{k_i}] \varepsilon_{r,i}, \\ \sigma_{rp,i} = \frac{E_p}{1-\mu_p-2\mu_p^2} (1 - \frac{\mu_p}{k_i}) \varepsilon_{r,i}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma_{zp,i} = \frac{E_p}{1-\mu_p-2\mu_p^2} [(1-\mu_p) - 2\mu_p k_i] \varepsilon_{z,i}, \\ \sigma_{rp,i} = \frac{E_p}{1-\mu_p-2\mu_p^2} (\mu_p - k_i) \varepsilon_{z,i}. \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得:

$$\frac{\sigma_{rp,i}}{\sigma_{zp,i}} = \frac{k_i - \mu_p}{2\mu_p k_i - (1 - \mu_p)}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{z,i} = \frac{\sigma_{zp,i}}{E_p} \frac{1 - \mu_p - 2\mu_p^2}{(1 - \mu_p) - 2\mu_p k_i}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{r,i} = \frac{\sigma_{zp,i}}{E_p} \cdot \frac{1 - \mu_p - 2\mu_p^2}{2\mu_p - \frac{(1 - \mu_p)}{k_i}}. \quad (6)$$

根据几何关系 $\varepsilon_{z,i} = \frac{\Delta s_{p,i}}{l_{p,i}}$ 和 $\varepsilon_{r,i} = -\frac{\Delta r_{p,i}}{r_p}$, 联合式(5),(6)可得第 i 桩单元段的竖向与径向变形分别为:

$$\Delta r_{p,i} = l_{p,i} \cdot \frac{\sigma_{zp,i}}{E_p} \cdot \frac{1 - \mu_p - 2\mu_p^2}{(1 - \mu_p) - 2\mu_p k_i}, \quad (7)$$

$$\Delta r_{p,i} = -r_p \cdot \frac{\sigma_{zp,i}}{E_p} \cdot \frac{1 - \mu_p - 2\mu_p^2}{2\mu_p - \frac{(1 - \mu_p)}{k_i}}. \quad (8)$$

式中: $\Delta s_{p,i}$, $\Delta r_{p,i}$ 分别为第 i 单元段的竖向压缩量和径向鼓胀变形; $l_{p,i}$ 为第 i 单元段的长度.

则散体材料桩桩身总压缩量为:

$$s_p = \sum_{i=1}^N \Delta s_{p,i}. \quad (9)$$

1.2 计算参数的确定

1) 桩周土所能提供的侧向约束力 $s_{rs}(z)$

当散体材料桩发生鼓胀变形时,其侧向约束力主要为桩侧竖向力引起的侧向土压力 $p_s(z)$;当桩顶铺有加筋垫层时,考虑筋材的侧向约束作用,垫层与土的水平摩阻力 f_m^0 及其沿深度的传递 $f_m(z)$ 也将向桩体提供侧向约束力,即可认为土对桩的侧向约束力 $s_{rs}(z)$ 为:

$$\sigma_{rs}(z) = p_s(z) + f_m(z), \quad (10)$$

$$p_s(z) = K_s(\gamma_s z + q_s). \quad (11)$$

式中: p_s 为桩侧土压力; $\gamma_s z$ 为深度 z 处土体的自重; K_s 为土压力系数,为偏于安全,通常可取静止土压力系数.

加筋垫层与土的水平摩阻力 f_m^0 可按式(12)计算:

$$f_m^0 = q_s \tan \varphi_{s0} + c_{s0}. \quad (12)$$

式中: φ_{s0} , c_{s0} 分别为垫层与土接触面上的内摩擦角与聚力; f_m^0 沿深度的传递 $f_m(z)$ 可由文献[9]方法进行计算:

$$f_m(z) = \frac{f_m^0}{\pi} \left[\ln \left(\frac{(r_e - r_p)^2}{z^2} + 1 \right) - \frac{(r_e - r_p)^2}{(r_e - r_p)^2 + z^2} \right]. \quad (13)$$

2) k_i 的确定

根据桩土交界面径向应力平衡,鼓胀段桩径向应力 $\sigma_{rp}(z)$ 等于桩周土能提供的侧向约束力 $\sigma_{rs}(z)$, 联合式(4),即可求得第 i 单元的 k_i 为:

$$k_i = \frac{\mu_p \sigma_{zp,i} - (1 - \mu_p) \sigma_{rs,i}}{\sigma_{zp,i} - 2\mu_p \sigma_{rs,i}}. \quad (14)$$

尚需注意,随深度增加桩侧土体可提供的侧向约束力逐渐增大,鼓胀深度 z_b 以下,桩体无鼓胀变形发生,即当计算深度 $z_i > z_b$ 时, $\Delta r_{p,i} = 0$, 此时 $k_i = 0$. 因此按式(14)计算时若出现 $k_i < 0$ 的情况,取 $k_i = 0$.

3) 第 $i+1$ 桩体竖向应力 $\sigma_{zp,i+1}$ 的计算

由第 i 单元段竖向力的平衡条件,可得深度 z_{i+1} 处 $\sigma_{zp,i+1}$ 为:

$$\sigma_{zp,i+1} = \sigma_{zp,i} + \gamma_p l_{p,i} - \frac{2\tau_{ps,i} l_{p,i}}{r_p + \Delta r_{p,i}}. \quad (15)$$

式中: γ_p 为碎石桩的重度; $A_{p,i}$ 为深度 z_i 处桩的横截面面积, $A_{p,i} = \pi (r_p + \Delta r_{p,i})^2$; $U_{p,i}$ 为深度 z_i 处桩的横截面周长, $U_{p,i} = 2\pi (r_p + \Delta r_{p,i})$; $\tau_{ps,i}$ 为桩土界面摩阻力, $\tau_{ps,i} = \sigma_{rp,i} \tan \varphi_{ps} + c_{ps}$; φ_{ps} , c_{ps} 为桩土接触面处的内摩擦角和粘聚力. 显然,当 $z=0$ 时, $\sigma_{zp}|_{z=0} = q_p$.

1.3 复合地基沉降计算

散体材料桩复合地基的沉降主要包括以下几个部分:复合地基中垫层的沉降(s_c),复合地基桩土加固区的沉降(s_p)及复合地基下卧层的沉降(s_s). 已有的研究表明^[10], s_c 较小,常可忽略. 则复合地基沉降量可视为加固区的压缩量 s_p 和加固区下卧层的压缩量 s_s 之和,即:

$$s = s_p + s_s. \quad (16)$$

下卧层压缩量 s_s 常采用分层总和法,即:

$$s_s = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{si}} H_i. \quad (17)$$

式中: Δp_i 为第 i 层土上的附加应力增量; H_i 为第 i 层土的厚度; E_{si} 为第 i 层土的压缩模量.

2 计算实例分析

为验证本文散体材料桩复合地基沉降计算方法的可行性,以文献[2]中算例进行分析.该算例为一烟囱基础,基底直径8.0 m,埋深2.2 m,基底平均附加压力60.0 kPa.自地面往下各土层分布及相应的主要物理力学性能指标如表1所示,其它参数详见文献[2].该复合地基中设有48根长6.8 m的碎石桩,桩端落于亚黏土层,桩径0.8 m,桩距1.6 m,梅花形布桩,桩顶平面铺有0.3 m厚碎石垫层.桩的泊松比 $\mu_p=0.25$,内摩擦角 $\varphi_p=40^\circ$,弹性模量 $E_p=12.5$ MPa.

表1 各土层主要物理力学性能指标

Tab.1 Main physical-mechanical properties of the soils

土层名称	厚度 /m	压缩模量 E_s /MPa	泊松比 / μ_s
填土	0.5	/	/
可塑状态黏土	2.6	6.5	0.35
淤泥质黏土或淤泥质亚黏土	6.0	4.0	0.4
亚黏土	3.6	4.0	0.4
粉砂层	6.0	/	/

由前述推导可知,本文方法计算散体材料桩复合地基沉降时,桩土应力比需作为一已知参数,然而准确确定桩土应力比非常困难,盛崇文建议^[2]对于该工程当设计荷载小于60 kPa时桩土应力比取3~5;大于60 kPa时取2~4.当沉降计算荷载为60 kPa时,已有文献^[2,7-8]中桩土应力取值有两种情况 $n=3$ ^[7-8]和 $n=4$ ^[2],为便于与其它文献计算结果对比分析,故本文方法计算沉降时,计算荷载亦取60 kPa,而桩土应力比取 $n=3$ 和 $n=4$ 分别加以计算.

本文方法计算时取桩土应力比 $n=3$,经计算得整个桩身压缩量 $s_p=28.9$ mm,其中鼓胀段的压缩量为7.4 mm,非鼓胀段的压缩量为21.5 mm;鼓胀深度 $h_b=0.9$ m;下卧层压缩量 $s_s=12.0$ mm;故整个碎石桩复合地基的沉降量为 $s=40.9$ mm.若取 $n=4$,得 $h_b=1.6$ m; $s_p=40.2$ mm; $s_s=12.0$ mm; $s=52.2$ mm.

与其它方法计算结果的比较见表2.其中,盛崇文^[2]是采用复合模量法计算加固区的压缩量,复合模量按式 $E_{sp}=[1+(n-1)m]E_s$ 计算;邓修甫等^[7]

是将碎石桩简化成等体积墙体,再根据碎石桩与桩间土的变形协调作用分鼓胀段与非鼓胀段两部分计算加固区的压缩量;基于邓修甫等的计算方法,孙林娜等^[8]将基桩与桩间土的相互作用视为空间问题来计算复合地基加固区的压缩量;各方法下卧层的压缩量均采用分层总和法得到.

表2 不同方法复合地基沉降量计算结果的比较

Tab.2 Comparison of settlement results from different methods

计算方法	鼓胀深度 /m	鼓胀段 压缩量 /mm	非鼓胀段 压缩量 /mm	下卧层 沉降量 /mm	复合地基 沉降量 /mm
盛崇文 ^[2] , $n=4$	—	桩身压缩量	39.0	12.0	51.0
邓修甫等 ^[7] , $n=3$	1.7	7.8	18.2	12.0	38.0
孙林娜等 ^[8] , $n=3$	1.7	12.2	19.5	12.0	43.7
本文方法, $n=3$	0.9	7.4	21.5	12.0	40.9
本文方法, $n=4$	1.6	15.0	25.2	12.0	52.2
实测值	—	—	—	—	41.0

由表2可见,采用复合模量法计算桩身压缩量较其它方法的计算结果偏大;邓修甫等方法^[7]将复合地基沉降计算简化成平面问题,强化了桩体作用,所得的复合地基沉降量偏小;孙林娜等方法^[8]计算复合地基沉降时,碎石桩的鼓胀深度为桩体极限受荷状态下的鼓胀变形深度,其中鼓胀段压缩量较本文方法($n=3$)偏大,非鼓胀段压缩量因非鼓胀段长度减小而较本文方法($n=3$)偏小;且孙林娜等方法^[8]因夸大了实际工作荷载作用下侧向鼓胀变形对复合地基沉降的影响,使得整个桩身压缩量较本文方法偏大.而本文方法采用静止土压力计算桩周土提供的侧向约束力偏小,变形量略为偏大,但可反映碎石桩鼓胀变形随荷载发展变化的实际情况.

3 结论

1) 基于桩体受荷发生竖向压缩变形及侧向鼓胀变形的特性,提出一新的散体材料桩复合地基加固区压缩量计算公式,进而可得整个复合地基的沉降量.

2) 与常规计算方法相比,本文方法从荷载传递规律出发,更符合散体材料桩复合地基的实际受力变形状况.

3) 利用本文方法对某一具体工程实例进行了计算,经与其它方法及实测值的比较分析,本文所得结果具有其合理性.

4) 本文方法计算散体材料桩复合地基沉降时, 桩土应力比需是已知参数, 而桩土应力比对复合地基沉降有一定程度影响, 实际设计中如何正确合理的选取散体材料桩复合地基桩土应力比仍有待进一步的深入研究.

参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 150—169.
GONG Xiao-nan. Theory and application of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002: 150—169. (In Chinese)
- [2] 盛崇文. 碎石桩复合地基的沉降计算[J]. 土木工程学报, 1986, 19(1): 72—80.
SHENG Chong-wen. Settlement of composite ground reinforced by stone columns[J]. China Civil Engineering Journal, 1986, 19(1): 72—80. (In Chinese)
- [3] 曹文贵, 唐旖旎, 王江营. 基于孔隙介质模型的散体材料桩复合地基沉降分层总和分析方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(11): 87—95.
CAO Wen-gui, TANG Yi-ni, WANG Jiang-ying. A layer-wise summation analysis method for the settlement of composite ground with friable material piles based on porous medium model[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2014, 41(11): 87—95. (In Chinese)
- [4] 张定. 碎石桩复合地基的作用机理分析及沉降计算[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 81—86.
ZHANG Ding. Functional mechanism analysis and settlement computation on composite foundation of gravel pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 81—86. (In Chinese)
- [5] 张定. 散体材料桩复合地基的沉降分析与计算[J]. 铁道学报, 1998, 20(6): 98—104.
ZHANG Ding. Settlement analysis and computation for composite foundation of friable material pile[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(6): 98—104. (In Chinese)
- [6] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 109—110.
GONG Xiao-nan. Composite foundation design and construction guideline[M]. Beijing: People's Transportation Press, 2003: 109—110. (In Chinese)
- [7] 邓修甫, 刘新华, 张琳. 碎石桩复合地基沉降计算方法[J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(4): 55—57.
DENG Xiu-fu, LIU Xin-hua, ZHANG Lin. A method to calculate the settlement of stone-column composite ground[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2003, 18(4): 55—57. (In Chinese)
- [8] 孙林娜, 龚晓南. 散体材料桩复合地基沉降计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 846—848.
SUN Lin-na, GONG Xiao-nan. Research on settlement calculation method of composite foundation of discrete material piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 846—848. (In Chinese)
- [9] B. A. 弗洛林. 土力学原理(第一卷)[M] 徐志英, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1973: 87—88.
B. A. Флорин. Fundamentals of soil mechanics (First volume)[M]. XU Zhi-ying, translate. Beijing: China Architecture and Building Press, 1973: 87—88. (In Chinese)
- [10] 饶为国. 桩-网复合地基原理及实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 30—50.
RAO Wei-guo. Principle and practice of pile-net composite foundation[M]. Beijing: China Water Resources and Hydro-power Press, 2004: 30—50. (In Chinese)