

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.144

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



层状地基中考虑桩端应力泡形扩散的单桩沉降计算方法

王立兴¹, 吴文兵^{1,2}, 杨晓燕¹, 张云鹏¹, 王奎华²

(1. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058)

摘要:基于虚土桩模型,研究了桩端应力扩散效应对单桩沉降的影响。结合虚土桩模型和 Boussinesq 解,提出考虑桩端应力泡形扩散的应力泡形虚土桩模型来考虑桩端土对桩的支承作用;利用荷载传递法,对桩周土采用双折线模型,推导得到层状地基中考虑桩端应力泡形扩散的单桩沉降解析解;讨论了弹性极限位移、弹性抗剪切刚度系数、附加应力值等参数对单桩沉降的影响;结合工程实测数据,将该方法与现有理论解进行对比,验证了方法的合理性。应力泡形虚土桩模型的最大优势在于能够较严格地给出桩端应力扩散边界,具有更广泛的工程应用价值。

关键词:单桩沉降;应力泡形虚土桩;层状地基;应力扩散;荷载传递法

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)06-0065-09

A calculation method for settlement of single pile considering stress bulb dispersion of pile end soil

WANG Lixing¹, WU Wenbing^{1,2}, YANG Xiaoyan¹, ZHANG Yunpeng¹, WANG Kuihua²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China; 2. Research Center of Coastal Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: Based on the fictitious soil pile model, the effect of pile-end stress diffusion on the settlement of a single pile has been investigated theoretically. Firstly, a pile-end stress-bubble fictitious soil pile model considering the spread of the pile-end stress-bubble was proposed to simulate the supporting effect of the pile end soil on the pile body by combining the fictitious soil pile model and Boussinesq solution. Then, based on the load transfer method, an analytical solution of single pile settlement considering pile-end stress-bubble diffusion in layered foundation was derived by utilizing the double-broken-line model for the soil around the pile. Furthermore, the effects of parameters such as elastic limit displacement, elastic shear stiffness coefficient and additional stress value on the settlement of single pile were discussed based on the present solution. Finally, combining with the actual engineering data, the present method was validated by comparing with existing theoretical solution. The stress-bubble fictitious soil pile model is more meaningful

收稿日期:2020-05-05

基金项目:国家自然科学基金(51678547, 51878634); 中国科协青年人才托举工程(2018QNRC001)

作者简介:王立兴(1997-), 男, 主要从事桩基动力学研究, E-mail: wanglixinghpu@163.com。

吴文兵(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zjuwwb1126@163.com。

Received:2020-05-05

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51678547, 51878634); Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No. 2018QNRC001)

Author brief: WANG Lixing (1997-), main research interest: pile dynamics, E-mail: wanglixinghpu@163.com.

WU Wenbing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zjuwwb1126@163.com.

for engineering applications on account of the obvious advantage that the stress diffusion boundary at pile end can be given more strictly.

Keywords: single pile settlement; stress-bubble fictitious soil pile; layered soils; stress diffusion; load transfer method

桩基沉降计算是桩基工程设计中非常重要的部分。学者们对桩基沉降进行了广泛而深入的研究,得到了很多有价值的单桩沉降计算方法,如荷载传递法^[1-7]、剪切位移法^[8-10]、弹性理论法^[11-13]、规范法^[14]和数值算法^[15-17]等,其中,荷载传递法因可通过不同的桩土相互作用模型来反映桩土共同作用、地基层状特性而被学者广泛运用。总的来说,基于荷载传递法的桩-土相互作用模型主要有理想弹塑性模型^[1,4-6]、双折线硬化模型^[3,18]、三折线模型^[19]及双曲线模型^[7],通过选取不同的桩-土相互作用模型,可以较准确地得到不同土性中单桩的沉降,具有较好的工程适用性。

上述研究采用荷载传递法计算桩基沉降时,均将桩端土对桩的支撑作用简化为弹簧模型,弹簧参数可结合桩端土硬化特性、非线性特性等根据实测的桩端反力-位移曲线反演确定。然而,这种弹簧支撑模型存在一些不足:无法考虑桩端土体的层状特性;无法建立桩端土层物理力学性质与弹簧参数之间的相互关系;且无法反映持力层内及以下土体性质的变化对单桩沉降的影响^[20]。为此,Wu等^[20-21]提出了虚土桩模型,并用于桩基纵向和扭转动力特性分析。随后,王奎华等^[22]率先将虚土桩模型应用于层状地基中的单桩沉降计算分析,并提出采用锥型虚土桩模型来考虑桩端应力扩散效应对单桩沉降的影响^[23],辛冬冬等^[24]将虚土桩模型推广到层状地基中的群桩沉降分析。尽管虚土桩模型能很好地考虑桩端层状特性对基桩静动力学特性的影响,且能在一定程度上考虑桩端应力扩散效应,但虚土桩的合理长度及应力扩散影响范围到底多大仍不得而知。

为了更好地分析桩端土性质对单桩沉降的影响,笔者基于 Boussinesq 解提出了一种应力泡形虚土桩模型来考虑桩端应力扩散效应,并基于荷载传递法对桩侧土采用双折线模型、对桩端土采用应力泡形虚土桩模型,考虑桩端土中实际附加应力的分布情况,推导得到了成层地基中的单桩桩顶沉降计算公式。

1 数学模型及假设条件

1.1 应力泡形虚土桩模型的建立

根据 Boussinesq 解可知,桩端土体中附加应力大致的分布规律为:在径向上随着径向半径的增加逐渐减小,在竖向上随着深度的增加也逐渐减小,在整体空间中呈椭球型泡状分布,即应力泡。假设桩端对土体的作用力为均布荷载形式,根据 Boussinesq 解可以求出桩端土中应力分布形式的解析式,然后建立应力泡形虚土桩模型。建立如图 1 所示的轴对称坐标系,基于 Boussinesq 解,通过积分可以求得圆形均布荷载作用下地基土体中任意一点的竖向应力分布^[25]。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_z}{P} = \frac{3z^3}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{r d\theta dr}{(z^2 + r^2 + R^2 - 2Rr \cos \theta)^{\frac{5}{2}}} \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为附加应力分布线; σ_z 为地基中任意点的竖向应力; P 为桩端平均应力,即均布荷载; z 为任意点的深度,即距桩端的竖向距离; R 为任意点的径向距离,即距均布荷载的水平距离; r_0 为桩体半径,即圆形荷载的作用半径; r 为均布荷载微单元距离均布荷载中心(即桩轴心)的距离; θ 为均布荷载微单元与任意点在水平面上投影的夹角。

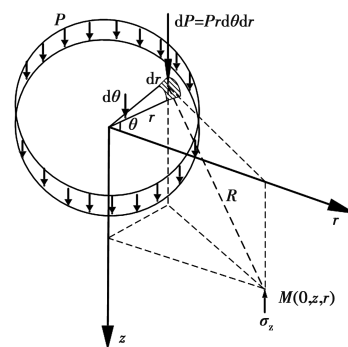


图 1 桩端附加应力计算模型

Fig. 1 Calculation model of additional stress at pile end

将式(1)求解得到的相同数值的竖向应力等值线绕 z 轴旋转一周就形成一系列以 z 轴为中心的三维应力等值面,将等值面以内的土体看作是受荷主体,即为应力泡形虚土桩的主体部分,如图 2 所示。

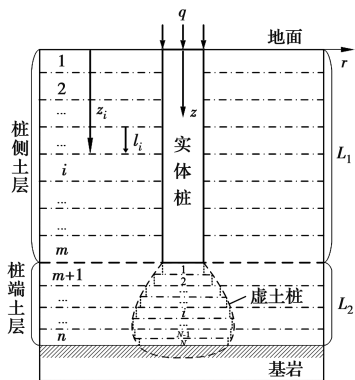


图 2 应力泡形虚土桩模型

Fig. 2 Stress-bubble fictitious soil pile model

1.2 桩土相互作用模型的建立

桩周土采用双折线模型,如图 3 所示,荷载传递函数为

$$\begin{cases} f_s = \lambda u & u \leq u_b \\ f_s = \lambda u_b & u > u_b \end{cases} \quad (2)$$

式中: u 为桩周土的位移; u_b 为桩周土的弹性极限位移; f_s 为单位长度桩周侧摩阻力; λ 为理想弹性模型的弹性抗剪切刚度系数, kN/m^2 。

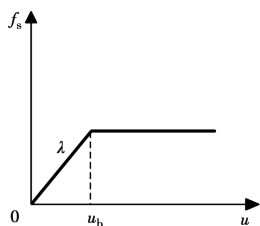


图 3 桩周土本构模型

Fig. 3 Constitutive model of soil around pile

桩端土采用应力泡形虚土桩模型,把桩端至基岩之间的应力泡形土体看成“土桩”,即所谓虚土桩,其参数分别取各实际土层参数,而变形按类似于桩的平面假定。根据桩端土层成层性情况及桩端土体性质和受力环境是否变化而把实体桩和虚土桩一共分为 $n(n > m)$ 段,其中实体桩分成 m 段,虚土桩分成 N (即 $N = n - m$) 段,从实体桩顶部向下依次编号为 $1, 2, \dots, i, \dots, m, m + 1, \dots, n$,各桩段厚度分别为 $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$,实体桩总长为 L_1 ,虚土桩总长为 L_2 ,各段桩的埋深分别为 $z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n$ 。计算时,可以将虚土桩各桩段再细分为很薄的圆柱体进行近似计算,计算精度由单元数 N 控制,计算中可以直接将桩土体系按照 $m + N$ 段进行计算。具体的桩体分段与桩土相互作用体系简图如图 2 所示。由

式(1)可求得虚土桩各深度桩段对应的半径 R_i ,即各段实体桩和虚土桩的半径分别为

$$\begin{cases} r_i = r & 1 \leq i \leq m \\ r_i = R_i & m < i \leq n \end{cases} \quad (3)$$

1.3 桩土体系相关假设

1) 桩土体系呈线弹性状态,实体桩桩身截面均匀,虚土桩以应力泡的形式存在。

2) 桩体与土体之间没有相对滑移,实体桩与虚土桩的各桩段交界面之间为完全连续接触,满足连续性条件。

3) 桩单元中任意点的位移只与该点的桩周侧摩阻力有关,虚土桩端部为刚性支撑。

4) 地基中同一土层的物理力学性质沿深度方向不变。

5) 虚土桩的力学行为与桩体相符合,参数为土体参数。

2 桩顶沉降计算方程建立及求解

根据荷载在桩身的传递机理,桩体的截面轴力及位移随深度的增加,逐渐减小,且随着桩顶荷载的增加,截面轴力及位移逐渐向桩底发展。因此,随着荷载的增加,桩周土由浅入深逐渐进入塑性阶段。根据桩土体系所处状态的不同,分 3 个阶段分别给出桩顶荷载和沉降的计算公式。需要说明的是,由于桩基受力后通常仅对桩周径向一定范围内的土体产生影响,这里所指的桩周土体即桩基应力影响范围内的土体。

首先推导荷载传递函数基本微分方程,根据桩上任意一个单元体的静力平衡条件,可以得到

$$\frac{dP}{dz} = -\lambda u \quad (4)$$

$$\frac{du}{dz} = -\frac{P}{EA} \quad (5)$$

式中: E 为该桩段弹性模量; A 为该桩段截面面积; P 为该桩段顶部荷载。

对式(5)两端求导,并将式(4)代入,可得荷载传递法的基本微分方程

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{\lambda u}{EA} \quad (6)$$

2.1 桩周土全部处于弹性阶段

当桩顶荷载较小时,桩周土全部处于弹性阶段,根据式(4)~式(6),此时第 i 个桩段截面位移 $u(x)$ 应满足方程

$$\begin{cases} E_i A_i \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda_i u = 0 \\ E_i A_i \frac{du}{dx} \Big|_{x=z_i} = -P_{i+1} \\ u \Big|_{x=z_i} = S_{i+1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_i 为第 i 段桩体顶部荷载; S_i 为第 i 段桩体顶部位移; z_i 为第 i 段桩体截面到桩顶的距离; E_i 为第 i 段桩体弹性模量; A_i 为第 i 段桩体横截面积; λ_i 为第 i 段桩体弹性抗剪切刚度系数。

各虚土桩段面积 A_i 值计算采用式(8)。

$$\begin{cases} A_i = \pi r^2 & 1 \leq i \leq m \\ A_i = \pi R^2 & m < i \leq n \end{cases} \quad (8)$$

为使解析表达式简洁,定义式(9)。

$$b_i = \sqrt{\lambda_i / (E_i A_i)} \quad (9)$$

求解式(7)可得第 i 桩段截面位移为

$$u(x) = \frac{b_i S_i - \frac{P_{i+1}}{E_i A_i}}{2b_i} e^{b_i(x-z_i)} + \frac{b_i S_i + \frac{P_{i+1}}{E_i A_i}}{2b_i} e^{-b_i(x-z_i)} \quad (10)$$

联立式(7)与式(10)可求得第 i 段桩的桩顶荷载及位移为

$$P_i = -E_i A_i \frac{du}{dx} \Big|_{x=z_i-l_i} = \frac{1}{2} E_i A_i \left[\left(\frac{b_i S_{i+1} + \frac{P_{i+1}}{E_i A_i}}{e^{b_i l_i} - \left(b_i S_{i+1} - \frac{P_{i+1}}{E_i A_i} \right) e^{-b_i l_i}} \right) \right]$$

$$S_i = u \Big|_{x=z_i-l_i} = \frac{b_i S_{i+1} + \frac{P_{i+1}}{E_i A_i}}{2b_i} e^{b_i l_i} + \frac{b_i S_{i+1} - \frac{P_{i+1}}{E_i A_i}}{2b_i} e^{-b_i l_i} \quad (11)$$

由式(11)可得第 i 段桩的桩顶刚度 K_i (刚度是指材料或结构在受力时抵抗弹性变形的能力)。

$$K_i = \frac{P_i}{S_i} = b_i E_i A_i \frac{K_{i+1} + b_i E_i A_i \tanh(b_i l_i)}{b_i E_i A_i + K_{i+1} \tanh(b_i l_i)} \quad (12)$$

由假设条件(3)可以得知,虚土桩桩端位移为0,即

$$u \Big|_{x=L_1+L_2} = S_{n+1} = 0 \quad (13)$$

由式(10)和式(11)给出的第 i 段桩的桩顶荷载及位移并结合边界条件式(13)就可以求得第 n 段桩的桩顶刚度为

$$K_n = \frac{P_n}{S_n} = b_n E_n A_n \frac{e^{2b_n l_n} + 1}{e^{2b_n l_n} - 1} \quad (14)$$

根据式(12)和式(14)可以递推得到桩体顶部刚

度 K_1 , 进而根据桩顶荷载 P_1 , 就可以求得桩顶沉降值 S_1 。

$$S_1 = \frac{P_1}{K_1} \quad (15)$$

式(12)和(14)中所需要的计算参数均可以由实测的土层参数直接或间接计算得到。因此,根据式(11)~式(15)就可以求得桩顶沉降值。

2.2 桩周土部分处于塑性阶段

桩周土部分处于塑性阶段时,桩土的相互作用体系简图如图4所示,塑性桩段的长度为 L_a , 由于塑性桩段的长度 L_a 与桩顶荷载和桩周土的性质有关,在实际工程应用中应当根据现场试验确定桩周土处于塑性阶段的深度 L_a 。

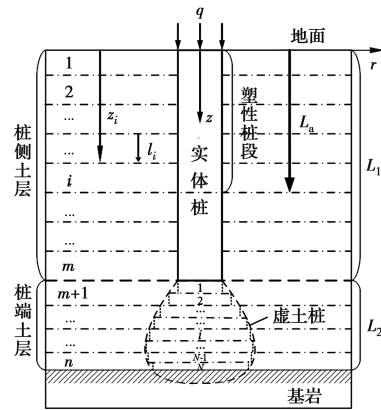


图4 桩周土部分进入塑性阶段模型

Fig. 4 Model of part of the soil around the pile reaching plastic stage

对于桩侧土体处于塑性阶段的连续桩段,第 i 个桩段截面位移 $u(x)$ 应该满足方程

$$\begin{cases} E_i A_i \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda_i u_{bi} = 0 \\ E_i A_i \frac{du}{dx} \Big|_{x=z_i} = -P_{i+1} \\ u \Big|_{x=z_i} = S_{i+1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: u_{bi} 表示第 i 桩段桩周土的极限位移。

求解式(16)可得第 i 段桩的截面位移方程为

$$u(x) = \frac{\lambda_i u_{bi}}{2E_i A_i} x^2 - \frac{P_{i+1} + \lambda_i u_{bi} z_i}{E_i A_i} x + S_{i+1} + \frac{P_{i+1} z_i}{E_i A_i} + \frac{\lambda_i u_{bi} z_i^2}{2E_i A_i} \quad (17)$$

求得第 i 段塑性桩的桩顶荷载及位移为

$$\begin{cases} P_i = P_{i+1} + \lambda_i u_{bi} l_i \\ S_i = S_{i+1} + \frac{P_{i+1} l_i}{E_i A_i} + \frac{\lambda_i u_{bi} l_i^2}{2E_i A_i} \end{cases} \quad (18)$$

根据假设,当桩周土部分处于塑性阶段时,可以

依据桩周土所处的状态把桩分为两个部分,即塑性段和弹性段,先按照式(11)~式(15)计算弹性桩段的刚度,再按照式(18)计算塑性桩段的刚度,就可以得到单桩桩顶沉降值。

2.3 桩周土全部处于塑性阶段

桩周土全部处于塑性阶段时,如图 4 所示,即 $L_a=L_1+L_2$ 。可求得第 n 段桩的桩顶荷载及位移为

$$S_n = \frac{l_n}{E_n A_n} P_n - \frac{\lambda_n u_{bn} l_n^2}{2 E_n A_n} \quad (19)$$

当桩周土全部处于塑性阶段时,结合式(18)和式(19)递推就可以得到单桩桩顶沉降值。

3 计算参数的选取及影响

3.1 弹性极限位移 u_b

对于弹性极限位移,很多学者都有研究,目前有经验法^[26-27]、经验公式法^[28]及应变计测试方法^[29]。为了在实际工程应用中方便取值,建议采用应变计测试方法进行计算。

$$u_{bi} = s_0 - \sum_{j=1}^i \frac{l_j}{2} (\epsilon_i + \epsilon_{i+1}) \quad (20)$$

式中: s_0 为桩顶沉降量; u_{bi} 为第 i 段桩土体系的极限位移; l_i 为第 i 段桩的长度; ϵ_i 为静载试验中在桩顶作用承载力设计值时第 i 个测试面的应变。

通过静载试验,将加载到极限承载力时测试得到的桩顶沉降量和应变值代入式(20),就可以求得桩土弹性极限位移。

3.2 弹性抗剪切刚度系数 λ

与弹性极限位移类似,为了在实际工程应用中方便取值,建议弹性抗剪切刚度系数采用应变计测试方法进行计算。

$$\lambda = \frac{\tau_{ui}}{u_{bi}} = \frac{\tau_i}{u_i} \quad (21)$$

式中: τ_{ui} 为第 i 段桩的极限侧摩阻力; τ_i 与 u_i 为静载试验某一级荷载作用下计算得到的第 i 段桩的侧摩阻力与相对位移。

在双折线模型中, λ 为斜线段斜率,知道任一点的侧摩阻力和相对位移就可以计算得到抗剪切刚度系数。

3.3 附加应力值 σ_z

由式(1)可以看出,附加应力值 σ_z 是利用应力泡形虚土桩模型分析单桩沉降的一个重要参数,选取不同的附加应力值 σ_z 意味着选用了范围大小不同的应力泡形虚土桩模型,如图 5 所示。桩端土体

的沉降对桩顶沉降有较大的贡献,因此,选取范围不同的应力泡形虚土桩模型对桩顶沉降影响很大。

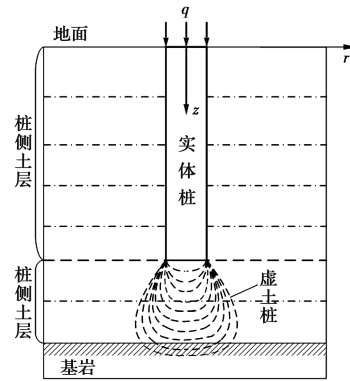


图 5 泡形不同的虚土桩模型

Fig. 5 Virtual soil pile models with different bubble shapes

3.3.1 算例 1:桩端土为软弱土 为了考虑桩端应力泡范围不同的影响,取上硬下软双层土作为算例 1,实体桩深度范围内为硬黏土,虚土桩范围内为软弱土,土层参数来源于文献^[30],如表 1 所示。

表 1 算例 1 各参数取值^[30]

Table 1 Values of parameters in study 1

土层号	L/m	E_s/MPa	$\lambda/(kN \cdot m^{-2})$	u_b/mm
1	20	500	4×10^4	6
2	10	3	8×10^3	3

桩身弹性模量 $E_p = 3 \times 10^4 MPa$,桩身半径 $r_0 = 0.5 m$,桩顶荷载 P 取 2 000、3 000、4 000 kN,附加应力值 σ_z 取 $0.1P \sim 0.000 01P$,虚土桩部分按照 0.5 m 分层计算,得到桩顶的沉降值如图 6 所示。

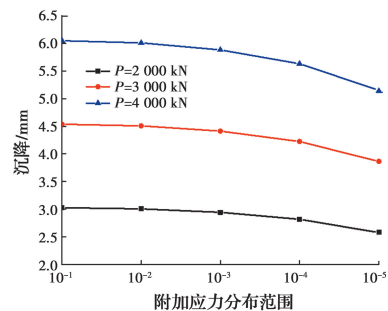


图 6 上硬下软土层中应力泡范围对桩顶沉降的影响

Fig. 6 Influence of stress bubble range on pile top settlement in upper and lower soft soil layers

如图 6 所示,在桩侧土为硬土,桩端土为软土的双层地基中,附加应力范围对桩顶沉降的影响不明显,沉降变化不大。整体上,随着附加应力范围的增大(即应力泡形虚土桩范围增大),桩顶沉降随之减

小,但减小幅度不大。

3.3.2 算例 2:桩端土为硬黏土或砂性土 取上软下硬双层土作为算例 2,实体桩深度范围内为软弱土,虚土桩范围内为硬黏土或砂性土,各参数取值如表 2 所示。

表 2 算例 2 各参数取值^[30]

Table 2 Values of parameters in study 2

土层号	L/m	E_s/MPa	$\lambda/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	u_b/mm
1	20	3	8×10^3	3
2	10	500	4×10^4	6

桩身弹性模量 $E_p = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$, 桩身半径 $r_0 = 0.5 \text{ m}$, 桩顶荷载 P 取 2 000、3 000、4 000 kN, 附加应力值 σ_z 取 $0.1P \sim 0.000\ 01P$ 时, 虚土桩部分按照 0.5 m 分层计算, 得到桩顶的沉降值如图 7 所示。

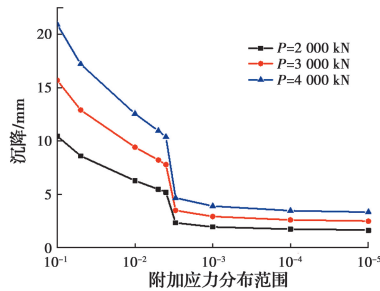


图 7 上软下硬土层中应力泡范围对桩顶沉降的影响

Fig. 7 Influence of stress bubble range on pile top settlement in upper and lower hard soil layers

如图 7 所示,在桩侧土为软土,桩端土为硬土的双层地基中,附加应力范围对桩顶沉降的影响明显,尤其是附加应力分布线 $\bar{\sigma}$ 从 $0.1 \sim 0.001$ 变化时,沉降变化较大,特别是当附加应力分布线 $\bar{\sigma}$ 从 $0.003 \sim 0.004$ 变化时会有一个沉降突变,这是由于应力泡的影响深度大于桩端土的厚度,即应力泡下端部分变成了基岩,而基岩不发生沉降,因此桩顶沉降突然减小。但整体上,随着附加应力范围的增大(即应力泡形虚土桩范围增大),桩顶沉降随之减小,并且当附加应力范围的增大到一定值后,桩顶沉降变化幅值变小。

综合上述分析发现,当桩周土性好时,桩以侧阻为主,应力泡形虚土桩范围的大小对桩顶沉降量影响不大;而当桩周土性差时,桩以端承为主,应力泡形虚土桩范围的大小对桩顶沉降量影响明显;且当应力泡的影响深度大于桩端土层厚度时,会有沉降值的突变。实际工程中,应针对不同类型的桩周土

及桩端土的性质与桩端土的厚度,选择合适的应力泡范围,当桩端土厚度并非过大时,可以选择应力泡的影响深度等于桩端土厚度时的应力泡作为虚土桩模型的边界进行计算。

4 工程实例分析

王奎华等^[23]提出了考虑应力扩散角的桩顶沉降计算模型,并通过计算两根试桩的沉降与实测值对比验证了其适用性。为验证该方法的合理性及实用性,对文献[23]中的 T_3 、 T_4 桩进行拟合,并将拟合结果与原文实测值及其计算值做对比分析,与文献[23]保持一致,采用桩周土处于弹性阶段公式计算。桩周土及桩端土的物理力学性质参数来源于文献[23],如表 3 所示。

表 3 实例地质资料与模型参数^[23]

Table 3 Geological information of example and parameters of model^[23]

土层号	土层名称	深度/m	$\lambda/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	E_s/MPa
1	粉质黏土	2.5	2.51×10^3	5
2	粉土	6.5	2.48×10^3	4
3	淤泥质粉质黏土	30.5	1.91×10^3	3
4	粉质黏土	33.5	1.35×10^4	10
5	粉土	35.5	7.69×10^3	10
6	粉砂	41.5	2.81×10^4	20
7	粉质黏土	48.5	1.42×10^4	6
8	粉质黏土	51.5	2.06×10^4	8
9	粉质黏土	58.8	1.17×10^5	20
10	粉土	61.9	1.60×10^5	17
11	粉质黏土	68.1	1.00×10^5	22
12	粉砂	71.5	8.57×10^4	25
13	粉质黏土	75.5	3.33×10^4	10
14	粉质黏土	81.1	1.08×10^5	18
15	粉土	87.6	1.60×10^5	20

T_3 试桩:桩直径为 800 mm,桩长 61.8 m; T_4 试桩:桩直径为 1 000 mm,桩长 73.8m,桩身弹性模量 $E_p = 3.3 \times 10^7 \text{ kPa}$ 。采用本文解计算各桩顶沉降量并与文献[23]计算结果及实测值对比,见图 8 及图 9。利用该方法计算时, T_3 桩与 T_4 桩的虚土桩部分取至第 15 层粉土底部,根据式(1)计算虚土桩影响深度刚好为第 15 层粉土底部时的 T_3 试桩附加应力值为 $0.000\ 36P$, T_4 试桩附加应力值为 $0.001\ 2P$,并分别选取此时的应力泡范围作为虚土桩边界进行

计算。

与两根试桩的实测值与文献[23]的扩散角法计算值对比可以发现,该方法考虑应力泡形扩散的计算结果与文献[23]考虑应力扩散角的计算结果较为接近,与实测结果具有较好的一致性。与文献[23]的锥形虚土桩模型相比,该模型的最大优势在于能够较严格地给出桩端应力扩散边界,因而具有更广泛的工程应用价值。

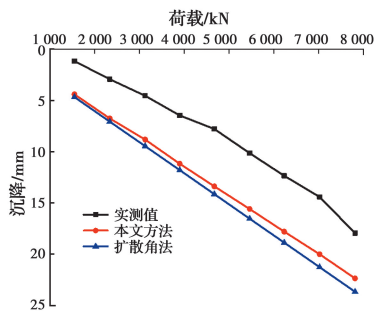


图8 T₃桩桩顶沉降计算结果对比

Fig. 8 Comparison of calculation results of pile top settlement of T₃ pile

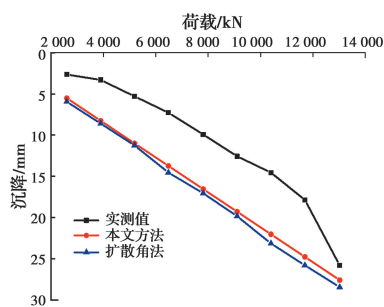


图9 T₄桩桩顶沉降计算结果对比

Fig. 9 Comparison of calculation results of pile top settlement of T₄ pile

5 结论

1) 基于虚土桩模型并结合 Boussinesq 解,提出了考虑桩端应力扩散效应的应力泡形虚土桩模型,并建立了基于该模型单桩沉降计算的解析解。该解能够计算桩侧土体处于弹性及塑性阶段时的桩顶荷载-沉降曲线,参数明确,应用简便,可以用于工程现场单桩沉降量的计算分析,为桩基础设计提供较为准确的沉降值。

2) 当桩周土性较好时,桩侧摩阻力发挥主要作用,桩周土承担主要荷载,应力泡范围的大小对桩顶沉降量影响不明显,可取较小范围的应力泡形虚土桩;当桩周土性较差时,桩端阻力发挥主要作用,桩

端土承担主要荷载,应力泡范围的大小对桩顶沉降量影响明显,应针对不同类型的桩周土及桩端土的性质与桩端土的厚度,选择合适的应力泡范围。

3) 通过分析不同附加应力取值对单桩桩顶沉降量的影响发现,当应力泡的影响深度大于桩端土厚度时,会发生沉降量的突变。因此,在工程应用中,可以选取应力泡的影响深度恰好是桩端土厚度时的应力泡形虚土桩模型进行计算。

4) 该方法与锥形虚土桩模型对两根试桩的沉降计算结果与实测结果对比表明,该方法的计算结果与实测结果有较好的一致性。同时,该模型的最大优势在于能够较严格地给出桩端应力扩散边界,因而具有更广泛的工程应用价值。

参考文献:

- [1] BOLTON SEED H, REESE L C. The action of soft clay along friction piles [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1957, 122(1): 731-754.
- [2] KRAFT L M, RAY R P, KAKAOKI T. Theoretical $t-z$ curves [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107(11): 1543-1561.
- [3] 陈龙珠, 梁国钱, 朱金颖, 等. 桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析算法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 30-38.
CHEN L Z, LIANG G Q, ZHU J Y, et al. Analytical calculation of axial load-settlement curve of piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(6): 30-38. (in Chinese)
- [4] 赵明华, 邹丹, 邹新军. 群桩沉降计算的荷载传递法[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 119-123.
ZHAO M H, ZOU D, ZOU X J. Settlement calculation of pile groups by load transfer method [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 119-123. (in Chinese)
- [5] 徐礼阁, 王奎华, 张鹏, 等. 层状地基中考虑桩侧水泥土与土的静钻根植桩单桩沉降计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 868-874.
XU L G, WANG K H, ZHANG P, et al. Calculation method for settlement of single static drill rooted pile considering cemented soil and soil around pile in layered soil [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 868-874. (in Chinese)
- [6] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 层状地基中静钻根植竹节桩单桩沉降计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(1):

- 109-116.
- ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. A simplified approach to calculating settlement of a single pre-bored grouting planted nodular pile in layered soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 109-116. (in Chinese)
- [7] 李镜培, 陈浩华, 李林, 等. 楔形单桩与群桩非线性荷载-沉降曲线计算方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 102-109.
- LI J P, CHEN H H, LI L, et al. A calculation approach for nonlinear load-settlement curve of single tapered pile and tapered pile group [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12): 102-109. (in Chinese)
- [8] RANDOLPH M, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups [J]. *Geotechnique*, 1979, 29(4): 423-439.
- [9] 高盟, 高广运, 杨成斌, 等. 层状地基群桩沉降计算的剪切位移解析算法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1072-1077.
- GAO M, GAO G Y, YANG C B, et al. Analytical solution for settlement of group piles in layered ground based on shear displacement method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1072-1077. (in Chinese)
- [10] 潘军, 杨小平, 刘庭金. 考虑桩身非线性压缩的单桩沉降解析算法[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(6): 1579-1584.
- PAN J, YANG X P, LIU T J. Analytical solution for single pile settlement considering non-linear compression of pile shaft [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(6): 1579-1584. (in Chinese)
- [11] POULOS H G. Analysis of the settlement of pile groups [J]. *Geotechnique*, 1968, 18(4): 449-471.
- [12] 张瑜, 吴江斌, 蔡永昌. 考虑桩径和桩侧摩阻力分布的改进 Geddes 桩基沉降分析方法[J]. *岩土力学*, 2015, 36(Sup2): 406-412.
- ZHANG Y, WU J B, CAI Y C. A modified Geddes' s method for estimating settlement of pile foundation considering influences of pile diameter and distribution pattern of shaft resistance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup2): 406-412. (in Chinese)
- [13] 赵明华, 马思齐, 肖尧, 等. 基于厚壁圆筒模型的筋箍碎石桩沉降计算[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(1): 101-108.
- ZHAO M H, MA S Q, XIAO Y, et al. Settlement calculation of geogrid-encased stone columns based on thick-walled cylinder model [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(1): 101-108. (in Chinese)
- [14] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [15] SHENG D C, EIGENBROD K D, WRIGGERS P. Finite element analysis of pile installation using large-slip frictional contact [J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(1): 17-26.
- [16] 贾煜, 宋福贵, 王炳龙, 等. 基于改进荷载传递法计算降水引起的基桩沉降[J]. *岩土力学*, 2015, 36(1): 68-74, 82.
- JIA Y, SONG F G, WANG B L, et al. Modified load transfer method for calculation of foundation pile settlement due to dewatering [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 68-74, 82. (in Chinese)
- [17] 林智勇, 戴自航. 由单桩荷载试验推算群桩沉降的相互作用系数法[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(1): 155-162.
- LIN Z Y, DAI Z H. Interaction factor method for piles group settlement by static load tests of single pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(1): 155-162. (in Chinese)
- [18] 张乾青, 李术才, 李利平, 等. 考虑侧阻软化和端阻硬化的群桩沉降简化算法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(3): 615-624.
- ZHANG Q Q, LI S C, LI L P, et al. Simplified method for settlement prediction of pile groups considering skin friction softening and end resistance hardening [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(3): 615-624. (in Chinese)
- [19] 刘杰, 张可能, 肖宏彬. 考虑桩侧土软化时单桩荷载-沉降关系的解析算法[J]. *中国公路学报*, 2003, 16(2): 61-64.
- LIU J, ZHANG K N, XIAO H B. Analytical method of load-settlement relation on single pile under pile-side softening [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(2): 61-64. (in Chinese)
- [20] WU W B, WANG K H, MA S J, et al. Longitudinal dynamic response of pile in layered soil based on virtual soil pile model [J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(7): 1999-2007.

- [21] WU W B, LIU H, EL NAGGAR M H, et al. Torsional dynamic response of a pile embedded in layered soil based on the fictitious soil pile model [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 80: 190-198.
- [22] 王奎华, 吕述晖, 吴文兵, 等. 层状地基中基于虚土桩模型的单桩沉降计算方法[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 75-83, 99.
WANG K H, LV S H, WU W B, et al. A new calculation method for the settlement of single pile based on virtual soil-pile model in layered soils [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 75-83, 99. (in Chinese)
- [23] 王奎华, 罗永健, 吴文兵, 等. 层状地基中考虑桩端应力扩散的单桩沉降计算[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(3): 472-479.
WANG K H, LUO Y J, WU W B, et al. Calculation method for settlement of single pile considering stress dispersion of pile end soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(3): 472-479. (in Chinese)
- [24] 辛冬冬, 张乐文, 宿传玺. 基于虚土桩模型的层状地基群桩沉降研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2368-2376, 2394.
XIN D D, ZHANG L W, SU C X. Settlement research of pile groups in layered soils based on virtual soil-pile model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2368-2376, 2394. (in Chinese)
- [25] 王宁, 王奎华, 房凯. 考虑应力扩散时桩端土对桩体阻抗的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(12): 89-94.
WANG N, WANG K H, FANG K. Influence of stress diffusion of soil surrounding pile tip on the pile impedance [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 89-94. (in Chinese)
- [26] POULOS H G. Modified calculation of pile-group settlement interaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(6): 697-706.
- [27] 洪毓康, 陈强华. 钻孔灌注桩的荷载传递性能[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 22-35.
HONG Y K, CHEN Q H. Load transfer behaviour of bored piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(5): 22-35. (in Chinese)
- [28] RANDOLPH M F, WORTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1978 (12): 56-61.
- [29] 董金荣, 林胜天, 戴一鸣. 大口径钻孔灌注桩荷载传递性状[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 123-131.
DONG J R, LIN S T, DAI Y M. The load transfer behavior of large diameter cast-in-situ pile in crushed pebble stratum [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(6): 123-131. (in Chinese)
- [30] 罗永健. 考虑虚土桩扩散角时基桩沉降计算理论及工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LUO Y J. Settlement calculation theory of single pile considering cone angle of fictitious pile and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)

(编辑 黄廷)