

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.012

沿海潮汐环境下灌注桩负摩阻力产生机理

吴继敏¹,魏继红²,杜金新²,彭森良²,冯 贤²

(1.河海大学科学研究院,江苏 南京 210098;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:对欠固结饱和软黏土环境中灌注桩负摩阻力的产生条件和产生机理进行分析.在考虑沿海潮汐环境下灌注桩双中性点产生机理的基础上,得出双中性点的产生条件,推导了双中性点条件下桩侧负摩阻力的解析解.针对双中性点出现的边界条件,在假设负摩阻力随桩体深度呈双曲线形式变化的基础上,推导了总负摩阻力的计算表达式.

关键词:灌注桩;负摩阻力;双中性点;潮汐环境

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)03-0299-05

随着我国经济的快速增长,在沿海软土地区,工程桩常常用在淤泥等比较软的软土环境中,桩周软土由于固结沉降将产生很大的负摩阻力,如图 1 所示.

负摩阻力的存在不仅增加了桩身负荷,而且降低了桩基承载力,与不存在负摩阻力的情形相比,将产生过大的沉降量,众多的工程实例证明了负摩阻力的存在对灌注桩受力的影响^[1-7],因此,沿海欠固结土环境中灌注桩负摩阻力的产生机理及受力性状的研究就显得尤为迫切.

双中性点问题在工程中并不常见,但在某些情况下,这方面的对工程桩的承载能力会产生一定的影响,因为它改变了桩的受力模式.当桩体处于膨胀土层且在雨季时,可对桩的受力特性产生与常规分析不同的结果,同样,桩体处于沿海地区受潮水位升降影响时,也会产生类似的影响,尤其是存在较大负摩阻力的桩,其影响不可忽视,应对其机理进行详细的分析^[8-10].本文在考虑沿海潮汐环境下灌注桩双中性点产生机理的基础上,得出双中性点的产生条件,推导了双中性点条件下桩侧负摩阻力的解析解.针对双中性点出现的边界条件,在假设负摩阻力随桩体深度呈双曲线形式变化的基础上,推导了总负摩阻力的计算表达式.

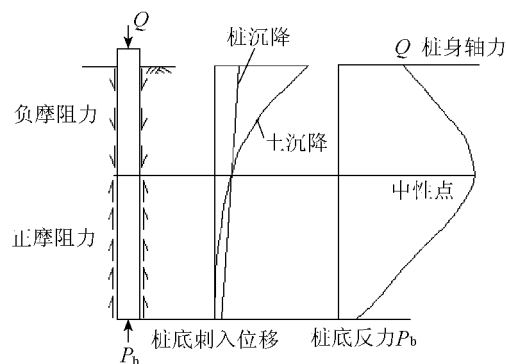


图 1 桩基负摩阻力问题示意图

Fig. 1 Negative skin friction for pile foundation

1 考虑双中性点问题时单桩负摩阻力的解析解

1.1 双中性点的形成机理

对于欠固结土层(如沿海围垦地区的土层),尤其在土层大多为淤泥或淤泥质土、土的状态处于流塑状态时,若在该环境下打灌注桩,随着土层的固结,桩体负摩阻力对桩的受力性状将产生较大影响,土层固结过程中由于潮水位升降对桩的影响常常改变灌注桩上部桩侧摩阻力的大小,甚至使负摩阻力改变为正摩阻力.随着时间的推移,桩侧的摩阻力逐渐从负摩阻力过渡到正摩阻力,其变化机理如图 2 所示.开始由于桩周土的固结,桩身上部(0.7~0.8 倍桩长范围内)承受负摩阻力的作用,桩身下部(0.2~0.3 倍桩长范围内)承受正摩阻力的作用,随着土层固结过程的发展,中性点位置上移,桩身部分负摩阻力作用的区域逐渐转化为正摩阻力作用区域,但此时上半部分仍承受负摩阻力的作用,直到由于外界环境的改变导致地表一定范围深度内

的土层产生向上的位移,使地表处摩阻力的大小逐渐变为零,甚至在桩顶一定深度的范围内出现正摩阻力,而此时桩身中段由于仍承受负摩阻力,以及桩身下半部分承受正摩阻力的作用,导致在桩身范围内出现 2 个中性点.

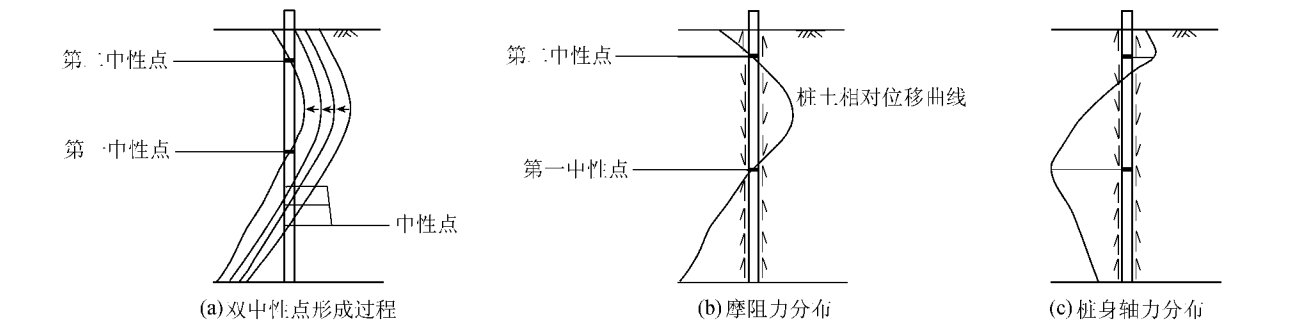


图 2 双中性点的形成机理示意图

Fig. 2 Generation mechanism of two-neutral point

双中性点的出现改变了桩体的受力性状,且 2 个中性点的特征并不相同.假设与地表接近的中性点为第二中性点,另外一中性点为第一中性点,从图 2 可看出,第一中性点和第二中性点的共同特点为桩土的相对位移均为零,但第一中性点桩截面承受压应力,而第二中性点桩截面承受拉应力.桩身轴力分布如图 2(c)所示.

1.2 双中性点数值分析验证

潮汐水位变化对桩基础的作用有一定程度的影响.以浙江沿海高速甬台温复线工程为实例进行验证,工况为:桩径 2.0 m,桩长 73.0 m,桩顶荷载 4 700 kN.预先在桩周边堆填厚 4.5 m、面积为 200 m×200 m 的土层,考虑堆填完成 5 000 d(约 13.7 a)后,堆填引起的土体固结已基本完成,在潮汐水位周期性变化(高水位与低水位相差 4 m)的影响下,将出现 2 个中性点的情况.堆填完成后桩侧摩阻力随深度变化曲线如图 3 所示,出现了 2 个中性点,中性点最大深度为地表以下 71.54 m 深度,约为桩身入土长度的 97.87%,另一中性点深度为地表以下 10 m 左右.

1.3 考虑双中性点的桩基负摩阻力的解析解

影响灌注桩负摩阻力的 2 个根本因素是桩侧的摩擦系数和法向正应力.摩擦系数与土的性质以及桩身的性质有关,而法向正应力取决于有效应力.有效应力计算得到的负摩阻力随深度不断增加,且认为负摩阻力分布于整个桩身.在一般情况下,桩土相对位移在桩顶处最大,随着深度的增加,桩身位移逐渐递减,然而以往通过大量的试验研究发现,黏土中桩侧摩阻力的分布并非单一的递减,而是随深度增加呈抛物线分布.对于负摩阻力来说,实际工程中出现最多的是由于桩周土的固结沉降而引起的负摩阻力,因此,桩侧摩阻力的产生确实与桩侧土体的应力及桩土的相对位移有关,现在普遍的观点认为桩侧摩阻力是二者共同作用的结果.2 种因素相互制约,相互作用,并通过某种分配关系形成一组最佳结合,来共同影响摩阻力,出现摩阻力的最大值点.因此,负摩阻力产生的过程是位移与有效应力不断协调的过程.

由以上的观点得出,桩侧摩阻力是有效应力与相对位移的某种组合,为此,假定桩侧摩阻力 τ 是有效应力和相对位移的函数:

$$\tau = f(\sigma', w)$$
 (1)

式中: σ' ——有效应力; w ——桩土相对位移.

韩佳明^[11]在其硕士论文中,通过弹性理论解答得出桩的负摩阻力为桩土相对位移二次式的结论.本文基于这一结论建立桩土相对位移 w 与沿桩身长度 x 之间的函数关系:

$$w = ax^2 + bx + c$$
 (2)

式中 a, b, c 为系数.

负摩阻力强度 G 沿桩身变化的量度为

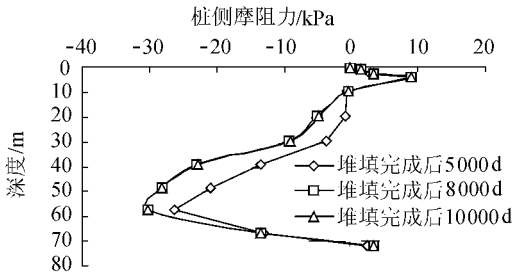


图 3 堆填完成后桩侧摩阻力随深度变化曲线

Fig. 3 Relationship between lateral skin friction and depth after placement of soil

$$G = \sigma w = \rho g x (ax^2 + bx + c) = \rho g ax^3 + \rho g bx^2 + \rho g cx \tag{3}$$

极值条件为

$$\frac{dG}{dx} = 3\rho g ax^2 + 2\rho g bx + \rho g c = 0 \tag{4}$$

由此确定摩阻力最大值产生的深度为

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} \tag{5}$$

式(5) 满足

$$-b - \sqrt{b^2 - 3ac} = 3ah_1 \quad (a > 0, b < 0, c > 0) \tag{6}$$

式中 h_1 ——第一中性点前摩阻力最大值的深度, $h_1 = \lambda H_1$, λ 为系数, H_1 为第一中性点的深度.

对中性点,由边界条件

$$\begin{cases} -b - \sqrt{b^2 - 3ac} = 3ah_1 \\ w|_{x=0} = ax^2 + bx + c|_{x=0} = s \\ w|_{x=H_1} = ax^2 + bx + c|_{x=H_1} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

解得

$$a = \frac{(2\lambda - 1)s}{\lambda H_1^2(3\lambda - 2)} \quad b = \frac{s(1 - 3\lambda^2)}{\lambda H_1(3\lambda - 2)} \quad c = s \tag{8}$$

式中 s 为桩顶相对沉降.

则桩土相对位移为

$$w = \frac{(2\lambda - 1)s}{\lambda H_1^2(3\lambda - 2)} x^2 + \frac{s(1 - 3\lambda^2)}{\lambda H_1(3\lambda - 2)} x + s \tag{9}$$

因此,求解中性点深度的表达式为

$$\frac{(2\lambda - 1)s}{\lambda H_1^2(3\lambda - 2)} x^2 + \frac{s(1 - 3\lambda^2)}{\lambda H_1(3\lambda - 2)} x + s = 0 \tag{10}$$

从前面提到的 2 个中性点的基本理论可知,式(10) 其中一个解为第一中性点的深度 H_1 ; 另一解为另一中性点的深度 H_2 ,其解答为

$$H_2 = \frac{\lambda(3\lambda - 2)}{2\lambda - 1} H_1 \tag{11}$$

要满足双中性点的基本条件,要求

$$\begin{cases} 0 < \frac{\lambda(3\lambda - 2)}{2\lambda - 1} < 1 \\ 0 < \lambda < 1 \end{cases} \tag{12}$$

解此方程得

$$\frac{2}{3} < \lambda < 1 \quad \text{或} \quad 0 < \lambda < \frac{1}{3} \tag{13}$$

第一中性点前摩阻力最大值产生的深度 h_1 为

$$h_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} = \frac{(3\lambda^2 - 1) + \sqrt{9\lambda^4 - 18\lambda^3 + 15\lambda^2 - 6\lambda + 1}}{3(2\lambda - 1)} H_1 \tag{14}$$

对第二中性点而言,其到地表之间的位移同样为二次函数关系

$$w = \frac{(2\eta - 1)s}{\eta H_2^2(3\eta - 2)} x^2 + \frac{s(1 - 3\eta^2)}{\eta H_2(3\eta - 2)} x + s \tag{15}$$

此时系数 η 只需满足

$$\frac{1}{2} < \eta < \frac{2}{3} \tag{16}$$

第二中性点前摩阻力最大值产生的深度 h_2 为

$$h_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} = \frac{(3\eta^2 - 1) + \sqrt{9\eta^4 - 18\eta^3 + 15\eta^2 - 6\eta + 1}}{3(2\eta - 1)} H_2 \tag{17}$$

韩佳明等^[11-13]通过试验研究表明:土体在重力作用下对桩身做功,因而产生负摩阻力,负摩阻力强度与深度的函数关系可用一个与度量负摩阻力(土体做功)相同次幂的多项式来表示,即可用一个三次插值多项式来表示:

$$f(x) = a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1 \tag{18}$$

依据边界条件:

$$x = \begin{cases} H_1 & f(x) = 0 \\ H_2 = \frac{\lambda(3\lambda - 2)}{2\lambda - 1} H_1 & f(x) = 0 \\ h_1 = \frac{(3\lambda^2 - 1) + \sqrt{9\lambda^4 - 18\lambda^3 + 15\lambda^2 - 6\lambda + 1}}{3(2\lambda - 1)} H_1 & f(x) = f_{\max} \end{cases} \tag{19}$$

假设: $A = H_1^3 - H_2^3, B = H_1^2 - H_2^2, C = H_1 - H_2, D = h_1^3 - H_2^3, E = h_1^2 - H_2^2, F = h_1 - H_2, J = h_1^3 - H_1^3, I = h_1^2 - H_1^2, K = h_1 - H_1$,解方程(18)可得系数为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{-Bb_1 - Cc_1}{A} \\ b_1 = \frac{Af_{\max} - (AF - CD)c_1}{EA - BD} \\ c_1 = \frac{Af_{\max}(AI - JB - EA + BD)}{(AI - JB)(AF - DC) - (EA - BD)(AK - JC)} \\ d_1 = -(a_1H_1^3 + b_1H_1^2 + c_1H_1) \end{cases} \tag{20}$$

由此可计算单桩总负摩阻力如下:

$$F = 2\pi r \int_{H_2}^{H_1} f(x) dx = 2\pi r \int_{H_2}^{H_1} (a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1) dx \tag{21}$$

2 算例分析

已知地基中灌注桩的直径为 0.8 m,桩长为 50 m,测得的桩土相对位移曲线如图 4 所示.

通过拟合得出相对位移曲线的方程为

$$w = 0.0026x^2 - 0.1252x + 0.9832 \tag{22}$$

从式(22)得出其第一中性点的深度 $H_1 = 38.27$ m;第二中性点的深度 $H_2 = 9.88$ m, $\lambda = 0.75, h_1 = 24.08$ m,假设测得的最大摩阻力为 50 kPa,可得: $A = 55\,085.54, B = 1\,366.98, C = 28.39, D = 12\,998.27, E = 482.23, F = 14.2, J = -42\,087.3, I = -884.75, K = -14.19$.

根据式(20)可得 $a_1 = 1.82 \times 10^{-12}, b_1 = -0.25, c_1 = 11.95, d_1 = -93.82$,则其总负摩阻力根据式(21)可解得 $F = 2\,378.35$ kN.

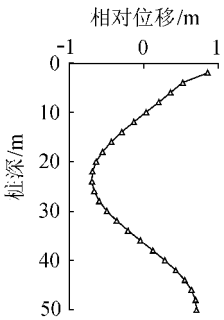


图 4 桩土相对位移-桩深曲线
Fig. 4 Relationship between relative displacement and pile depth

3 结 语

本文首先研究了在特殊环境下(沿海潮汐环境)灌注桩双中性点的产生机理,得出双中性点的产生条件,推导了双中性点条件下桩侧负摩阻力的解析解.然后,针对双中性点出现的边界条件,在假设负摩阻力随桩体深度呈双曲线形式变化的基础上,根据负摩阻力强度与深度的关系得出在双中性点条件下负摩阻力引起桩下拉荷载的大小,推导了总负摩阻力的计算表达式,并通过算例验证了推导理论的合理性.

参考文献:

[1] 赵明华,贺炜,曹文贵.基桩负摩阻力计算方法初探[J].岩土力学,2004,25(9):1442-1446.

[2] 陈志坚,韩学伟,白炳东.大直径超长钻孔灌注桩桩端后压浆机理探讨[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(4):409-412.

[3] 袁灯平,黄宏伟,马金荣.软土地基桩侧表面负摩阻力解析模型[J].上海交通大学学报,2005,39(5):731-735.

[4] 屠毓敏,俞洪良.负摩擦桩非线性分析[J].中国公路学报,2001,14(1):31-34.

[5] 黄锋,李广信,郑继勤.单桩在压与拔荷载下桩侧摩阻力的有限元计算研究[J].工程力学,1999,16(6):97-101.

[6] 孙军杰,王兰民.桩基负摩阻力研究中几个基本理论问题的探讨[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):211-216.

[7] 杨维好,黄家会.负摩阻力作用下端部嵌固桩的竖向稳定性分析[J].土木工程学报,1999,32(2):59-61.

[8] 鹿群,张岳文,郑述海,等.桩基负摩阻力的成因、机理与危害分析[J].河北建筑科技学院学报,2003,20(4):46-49.

[9] PAOLO C. Skin friction of large-diameter piles socketed into rock[J]. Canadian Geotechnical Journal,1997, 34: 230-240.

[10] 王俊林,马艳,苟利娟.大直径超长混凝土灌注桩受力特性试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):82-87.

[11] 韩佳明.桩基负摩阻力的计算研究[D].西安:西安科技大学,2004.

[12] 孙军杰,王兰民,黄雪峰.黄土地基湿陷时桩的负摩阻力最大值出现深度研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(4):20-25.

[13] 杨有莲,朱俊高.钻孔变截面灌注桩的荷载传递特性[J].水利水电科技进展,2008,28(3):37-39.

Generation mechanism of negative skin friction for cast-in-place piles in offshore tidal environment

WU Ji-min¹, WEI Ji-hong², DU Jin-xin², PENG Sen-liang², FENG Xian²

(1. Research Academy, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The generation conditions and mechanism of negative skin friction for the cast-in-place piles in underconsolidated saturated soft clay were analyzed. Based on the generation mechanism of the two-neutral point of the cast-in-place piles in an offshore tidal environment, the generation conditions for the two-neutral point were proposed. The analytic solutions for the lateral negative skin friction of the two-neutral point were deduced. The equation for the total negative skin friction was derived under the occurring boundary conditions of the two-neutral point and on the basis of the hypothesis of the hyperbolic curve for the negative skin friction of piles with depth.

Key words: cast-in-place pile ; negative skin friction ; two-neutral point ; tidal environment

·简讯·

北京国际力学中心无网格、质点类和扩展有限元法
国际学术研讨会将在南京召开

近年来,无网格、质点类和扩展有限元法的发展突飞猛进,国内外学者在广义流体动力学、非连续的光滑粒子流体动力学方法、爆炸模拟、水下爆炸冲击模拟、与分子动力学耦合的多尺度模拟等应用领域作出了大量贡献.为了进一步推动相关科研和学术活动的开展,北京国际力学中心拟于2009年10月12~17日在南京举办“北京国际力学中心无网格、质点类和扩展有限元法国际学术研讨会”.

大会主要就无网格、质点类和扩展有限元法的理论背景、数值方法、程序实施及其在许多领域的应用开展广泛的学术交流,探讨学科今后发展的方向.

所有会议论文将在CDROM论文集发表,部分论文将在国际或国内英文SCI刊物专辑出版.

会议论文提交将于2009年9月15日截止.

会议联系人:河海大学科技处邬萱,E-mail:wx@hhu.edu.cn;电话(传真):025-83786951.

(本刊编辑部供稿)