

考虑端承力时泊松效应对抗拔系数的影响

张忠苗, 刘念武, 房凯

(浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 大量的试验表明, 桩受到抗拔和抗压时, 其侧摩阻力是不同的, 即存在一个抗拔系数。对于工程中抗拔系数的计算, 考虑端阻力时更加符合实际情况, 以此为出发点对泊松效应下的抗拔系数进行了修正, 并得出了存在桩端阻力时, 桩顶荷载的抗拔和抗压计算公式, 并给出了桩周土层为多层时桩顶荷载的计算思路。最后, 对抗拔系数的影响因素进行了分析, 得出了抗拔系数的变化规律。

关键词: 抗拔系数; 泊松效应; 抗拔桩; 抗压桩; 侧摩阻力

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0494-04

作者简介: 张忠苗(1961-), 男, 浙江宁海人, 博士, 教授, 主要从事基础工程与桩基础的研究、教学、检测工作。
E-mail: 21012062@zju.edu.cn。

Influence of Poisson's effect on uplift coefficient considering tip resistance

ZHANG Zhong-miao, LIU Nian-wu, FANG Kai

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Uplift coefficient, the ratio of the friction resistance for uplift and compressive piles, has been documented widely by a number of authorities around the world. It is more appropriate and realistic to include the influence of the tip resistance in the calculation of the uplift coefficient. In this respect, the uplift coefficient associated with the Poisson's effect is corrected, and the formulas for pile head load under tension and compression are obtained. The method to predict the pile head load for pile head in multilayered soil is also presented. In addition, the influence of several factors on the uplift coefficient is also examined to provide better insight into it.

Key words: uplift coefficient; Poisson's effect; uplift pile; compressive pile; residual resistance

0 引言

随着经济社会的发展, 城市的建设用地日益紧张, 人们对地下空间的开发也越来越多, 地下结构的抗浮问题受到越来越大的重视, 国内外的研究表明抗拔桩对解决地下结构的抗浮问题能够起到很好的作用, 同时, 抗拔桩的高性价比使其应用更加广泛。

随着抗拔桩越来越多的被应用于工程中, 人们对于抗拔桩的承载力的研究也随着实践不断的深入。目前, 对于抗拔桩的研究主要有3种方法: ①简化计算方法, 该方法假定当达到极限抗拔力时桩周土沿一定的破裂面破坏, 主要包括倒锥台剪切破坏, 岩土破裂面和复合剪切破裂面, 所受的极限抗拔力为土体的极限摩阻力和桩体的重力之和。一些学者^[1-2]也对极限抗拔力提出了一些计算公式; ②规范方法^[3], 其主要思路是引入抗拔系数 λ 作为对抗压极限侧摩阻力的修正, 从而得出抗拔时的侧摩阻力, 最终得出极限抗拔力。抗拔系数 λ 经过大量工程资料证实确实存在, 实

测资料表明抗拔系数大小为0.44~0.85^[4], 一些规范也给出了一些土层的抗拔系数 λ ^[3], 比如沙土的抗拔系数 $\lambda=0.5\sim0.7$, 黏性土和粉土中抗拔系数 $\lambda=0.7\sim0.8$; ③通过计算机编程进行计算方法, 通过将抗拔桩周围土体简化成一个个小弹簧, 通过荷载传递法求得最终的抗拔承载力, 孙晓立等^[5]对此方法进行了探究。本文主要通过理论推导对抗拔系数 λ ^[6]进行了完善, 并给出了桩周有多种土层时抗拔系数的计算方法, 并结合工程实际进行了参数分析。

1 泊松效应对侧摩阻力的影响

当桩受到抗拔荷载时, 桩体内部相当于受到一个均布力, 因此必将引起径向尺寸的减小, 从而在一定程度上会造成桩与周围土体的脱离, 土体对于桩的摩擦力会相应减小。对于抗压桩, 这种情况恰恰相反,

抗拔桩的侧摩阻力相应增加。一些文献对此问题进行了详细的阐述^[6-7], 同时, 此文献也考虑了由于受荷场变化和主应力场变化对侧摩阻力的影响, 本文对后面这两个因素不作考虑, 仅考虑由于桩尺寸变化对侧摩阻力的影响。

抗拔系数计算过程中的两点约定:

(1) 一般条件下桩身深度为 z 时桩周侧摩阻力为 $\tau_0 = K_h \gamma z \tan \delta$, (1)

式中, K_h 为侧向土压力系数, 一般取静止土压力系数 K_0 , γ 为土体重度, δ 为桩土间摩擦角。

(2) 抗拔系数假定为抗拔桩所受侧摩阻力之和与抗压桩所受侧摩阻力之和的比值,

$$\lambda = P_t / P_c \quad (2)$$

式中, P_t , P_c 分别为单一土层中桩顶所能受的抗拉和抗压荷载。

Fleming 等^[8]给出了抗拔桩受荷后侧摩阻力的减少量公式:

$$\Delta \tau = 2G \nu_p p \tan \delta / AE_p \quad (3)$$

式中, ν_p 为桩的泊松比, G 为桩周土的剪切模量, p 为对应深度处桩身轴力, A 为桩身截面面积, E_p 为桩的弹性模量, δ 为桩土间摩擦角。

2 考虑端承力时抗拔系数的推导过程

取微元段进行分析, 当桩受压时

$$p + \Delta p = p + \pi d (\tau_0 + \Delta \tau) \quad (4)$$

$$\Delta p = [\pi d K_0 \gamma (L - z - \Delta z) \tan \delta + 2 \pi d G \nu_p p \tan \delta / AE_p] \Delta z \quad (5)$$

由式 (5) 可得

$$\frac{dp}{dz} = \pi d K_0 \gamma (L - z) \tan \delta + 2 \pi d G \nu_p p \tan \delta / AE_p \quad (6)$$

令 $B = 2 \pi d G \nu_p \tan \delta / AE_p$, $C = \pi d K_0 \gamma \tan \delta$, 原式可化为

$$\frac{dp}{dz} - Bp = C(L - z) \quad (7)$$

式 (7) 的通解为

$$p = De^{\int B dz} + e^{\int B dz} \int C(L - z) e^{-\int B dz} dz \quad (8)$$

对 p 进行求解可得

$$p = De^{Bz} + \frac{C[B(z - L) + 1]}{B^2} \quad (9)$$

当 $z = 0$, $p = p_b$, 同时令端阻比

$$\eta = p_b / p_c \quad (10)$$

带入边界条件可得

$$D = p_b - \frac{C(1 - BL)}{B^2} \quad (11)$$

将式 (11) 带入式 (9) 可得

$$p = [p_b - \frac{C(1 - BL)}{B^2}] e^{Bz} + \frac{C[B(z - L) + 1]}{B^2} \quad (12)$$

当 $z = L$ 时, 桩顶所受的抗压荷载

$$p_t = [p_b - \frac{C(1 - BL)}{B^2}] e^{BL} + \frac{C}{B^2} \quad (13)$$

由式 (10) 可知 $p_b = \eta p_c$, 将 p_b 带入式 (13) 可得

$$p_c = \frac{C[1 - (1 - BL)e^{BL}]}{B^2(1 - \eta e^{BL})} \quad (14)$$

用同样方法即可求得拔桩所能承受的受拉荷载, 而对于抗拔桩的边界条件为 $z = 0$, $p = 0$ 。求得抗拉力为

$$p_t = \frac{C[1 - (1 + BL)e^{-BL}]}{B^2} \quad (15)$$

求得抗拔系数为

$$\lambda = \frac{p_t}{p_c - p_b} = \frac{(1 - \eta_c e^{BL})[1 - (1 + BL)e^{-BL}]}{(1 - \eta_c)[1 - (1 - BL)e^{BL}]} \quad (16)$$

当不考虑端阻比时抗拔系数的计算公式为

$$\lambda = \frac{p_t}{p_c} = \frac{[1 - (1 + BL)e^{-BL}]}{[1 - (1 - BL)e^{BL}]} \quad (17)$$

可见, 对于文献[5]中提到的抗拔系数是式 (16) 的一种特例, 即 $\eta_c = 0$ 。

同理, 当受到端部荷载时, 抗拔力的计算公式为

$$p_t = [p_b - \frac{C(1 + BL)}{B^2}] e^{-BL} + \frac{C}{B^2} \quad (18)$$

式中, p_b 为端部受到的拉力, 其它参数如上。

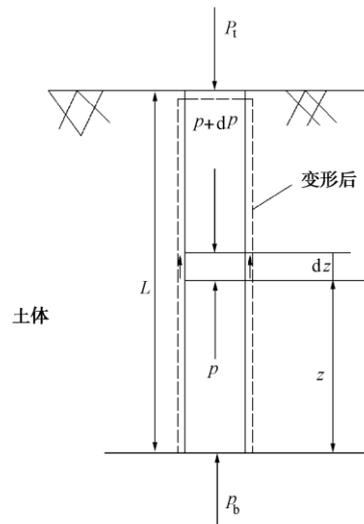


图 1 考虑泊松效应的桩基计算模型

Fig. 1 Computation model for piles considering Poisson's effect

3 桩周土为多层土时抗拔系数的计算思路

而对于实际工程中, 桩处于不同的土层中, 因此该式中的 B 值并不相同, 不能直接用式 (16) 对抗拔

系数进行计算，因此，需要将实际工程中的土层按土层性质进行划分，首先求出每段的 B_i ， L_i ，先根据桩受所受端阻力的大小，

$$P_{ci} = [P_{bi} - \frac{C_i(1 - B_i L_i)}{B_i^2}]e^{B_i L_i} + \frac{C_i}{B_i^2}, \quad (19)$$

即可求得第 1 层土上端部的受力大小，再将第 1 层土上端部的受力看成第 2 层土下端部的受力，再利用式 (19) 计算第 2 层土上端部的受力大小，通过此种方式不断向上叠加，最终即可求得桩顶所受的抗压荷载 P_c ，而对于桩受到抗拔力时，根据式 (18) 用相似的方法即可求得桩所能承受的抗拔力 P_t ，只是在计算抗拔力时，桩最下端所受力的大小为 0，其它与抗压桩相似。最终可以计算出当桩处在不同土层时的抗拔系数 $\lambda = P_t / P_c$ 。

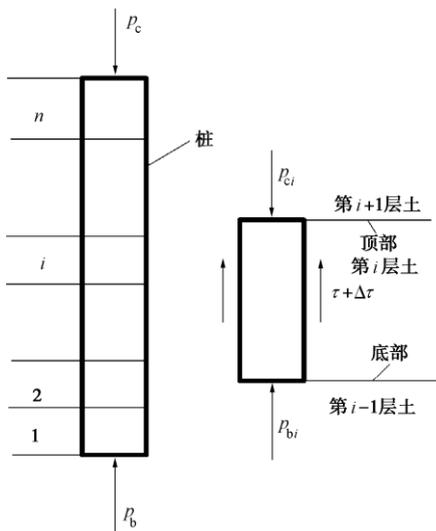


图 2 多层土中单桩

Fig. 2 Single pile located in multi-layered soil

4 参数分析

根据所得出的推导公式对公式中的一些参数进行分析，从而得出一些影响抗拔系数的主要因素，通过分析这些因素有利于我们对抗拔系数的准确判断。

表 1 参数分析算例表

Table 1 Parameters for different cases

算例	变量	其它常量参数
1	端阻比 η	$L/D = 80, \psi = 20^\circ, \delta = 30^\circ, \nu_p = 0.2, \gamma = 20 \text{ kN/m}^3, E_p = 30000 \text{ MPa}, G = 10 \text{ MPa}$
2	桩土摩擦角 δ	$\eta = 20\%, L/D = 80, \psi = 20^\circ, \gamma = 20 \text{ kN/m}^3, E_p = 30000 \text{ MPa}, \nu_p = 0.2, G = 10 \text{ MPa}$
3	土的剪切模量 G	$\eta = 20\%, L/D = 80, \psi = 20^\circ, \delta = 30^\circ, \gamma = 20 \text{ kN/m}^3, E_p = 30000 \text{ MPa}, \nu_p = 0.2$

4.1 端阻比对抗拔系数的影响

从图 3 可以看出，在已确定其它计算参数时，随着端阻比的增多，抗拔系数呈减小的趋势，且随着端阻比的增多，抗拔系数的变化率逐渐增大，当端阻比为 0.9 时，抗拔系数减小到 0.775，可以看出对于桩端力比例较大时，其对侧摩阻力的影响也较大，换言之，其引起的泊松效应也更加明显。

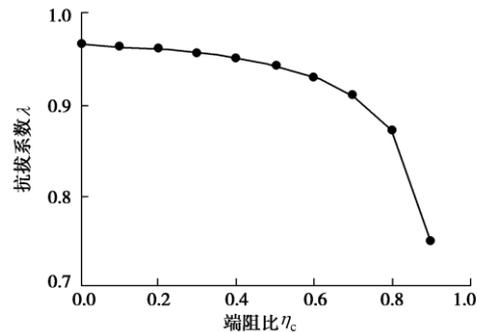


图 3 抗拔系数随着端阻比的变化示意图

Fig. 3 Variation of uplift coefficient with tip resistance ratio

4.2 土体剪切模量对抗拔系数的影响

从图 4 可以看出，随着土体剪切模量的增加，抗拔系数均呈近似线性减小，端阻比越大，抗拔系数减小的越迅速，同时也可看出，在端阻比处于不同的阶段，抗拔系数的减少率是不同的，端阻比越大，抗拔系数减小的越明显。

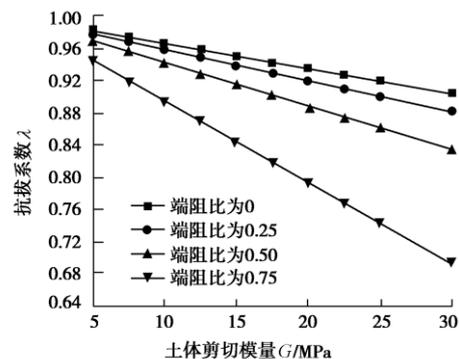


图 4 不同端阻比条件下抗拔系数与土体剪切模量的关系图

Fig. 4 Relationship between uplift coefficient and soil shear modulus under different tip resistance ratios

4.3 桩土摩擦角对抗拔系数的影响

从图 5 可以看出抗拔系数随桩土摩擦角的变化与随土体剪切模量的变化比较相似，都是呈近似线性减少，且随着端阻比的增大，抗拔系数减小的速率也逐渐变大，土体剪切模量对于抗拔系数的影响更为明显，当端阻比为 0.75 时，随剪切模量的增加，抗拔系数由 0.95 变为 0.69。而随着桩土摩擦角的增加，抗拔系数由 0.98 变为 0.90。

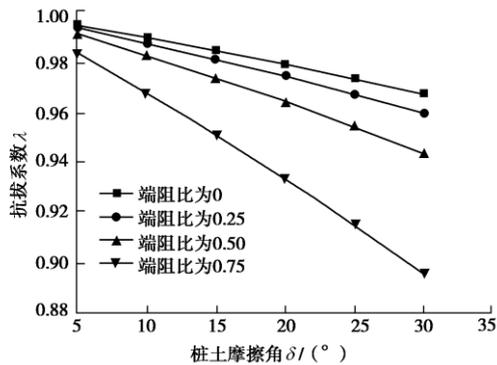


图 5 不同端阻比条件下抗拔系数与桩土摩擦角的关系图

Fig. 5 Relationship between uplift coefficient and pile-soil interface friction angle under different tip resistance ratios

5 结 论

本文通过对抗拔系数的公式进行了推导, 并得出了考虑桩端阻力时抗拔系数的计算公式, 同时, 本文给出了利用所推导的公式来求当桩处于不同土层时抗拔系数的计算思路。最后, 本文对影响抗拔系数的影响因素进行了分析, 可以看出, 端阻比对于抗拔系数的影响较为显著, 随着端阻比的增加, 抗拔系数逐渐减小。土的剪切模量和桩土摩擦角均对抗拔系数有一定的影响, 且基本呈线性减小关系。

参考文献:

- [1] 何思明. 抗拔桩破坏特性及承载力研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 308 - 310. (HE Si-ming. Study on bearing capacity and failure of uplift pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 308 - 310. (in Chinese))
- [2] 郦建俊, 黄茂松, 木林隆, 等. 分层地基中扩底桩抗拔承载

力的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1997 - 2003. (LI Jian-jun, HUANG Mao-song, MU Lin-long, et al. Research on computation methods of uplift capacity of enlarged base pile in layered soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1997 - 2003. (in Chinese))

- [3] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [4] DENICOLA A, RANDOLPH M F. Tensile and compressive shaft capacity of piles in sand[J]. Journal of Geotechnic Engineering, 1993, 119(12): 1952 - 1973.
- [5] 孙晓立, 杨敏. 使用修正变形协调法分析抗拔桩非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1270 - 1277. (SUN Xiao-li, YANG Min. Analysis of nonlinear deformation of uplift piles by modified method of deformation compatibility[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1270 - 1277. (in Chinese))
- [6] 王向军, 吴江斌, 黄茂松. 桩的泊松效应对抗拔系数 λ 的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1545 - 1548. (WANG Xiang-jun, WU Jiangbin, HUANG Mao-song. Influence of the poisson's effect on the anti-uplift coefficient of uplift piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1545 - 1548. (in Chinese))
- [7] ALAWNEH S A, NUSIER O K, SHARO A A. Poisson's ratio effect on compressive and tensile shaft capacity of driven piles in sand: Theoretical formulation[J]. Computers and Geotechnics, 2007(34): 151 - 163.
- [8] FLEMING W G K, WELTMAN A J, RANDOLPH M F, et al. Piling engineering[M]. 2nd ed. Scotland: Blackie, 1992.

(本文责编 胡海霞)