

文章编号:1673-2049(2008)03-0017-05

锚杆变形分析与临界锚固长度计算

赵明华¹, 刘峻龙², 龙 照²

(1. 湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082;

2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:首先引入桩土荷载传递规律的剪切位移模式, 结合轴向 Winkler 地基模型, 建立了锚杆荷载传递基本方程, 利用单元体平衡和锚杆、土体变形协调及边界条件, 推导出锚杆抗拔荷载与位移关系的解析解, 从而导出锚杆临界锚固长度的计算公式; 然后, 对影响锚杆临界锚固长度的主要因素进行了分析, 得出一些定性的结论; 最后, 以某高层建筑深基坑支护工程中的锚杆为计算实例进行了分析。结果表明: 理论计算结果与实测锚杆荷载变形曲线的直线段吻合较好; 临界锚固长度的计算是合理的, 可为锚杆设计提供参考。

关键词:锚杆; 荷载传递; Winkler 地基模型; 位移; 变形; 临界锚固长度

中图分类号: TU472

文献标志码: A

Deformation Analysis of Bolt and Calculation of Critical Anchorage Length

ZHAO Ming-hua¹, LIU Jun-long², LONG Zhao²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. China Northwest Municipal Engineering Design and Research Institute Ltd, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Firstly, the mode of shear displacement of pile-soil load transfer regular was introduced, and the basic equation of bolt load transfer was built by combining axial Winkler foundation model. The analytical solution of the relation between load and deformation of bolt and uplift pile was deduced by using the balance of unit body, deformation coordination between anchor and soil and boundary condition, so as to deduce the calculation formulae of bolt critical anchorage length. Then, the major factors influencing the bolt critical anchorage length were analyzed, and some qualitative conclusions were got. Finally, analysis was carried by taking a bolt in deep foundation pit engineering for high-rise building as an example. The results indicate that the theoretical calculation results match well with the actual measurement results of bolt load-deformation curves; the calculation of critical anchorage length is reasonable, and can be used as a reference for design of bolt.

Key words: bolt; load transfer; Winkler foundation model; displacement; deformation; critical anchorage length

收稿日期: 2008-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578060)

作者简介: 赵明华(1956-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: mhzhao@21cn.com。

0 引言

近十几年来,在深基坑支挡工程中,土层锚固技术占有重要的地位,与传统的桩、板、墙、管、撑等支挡方法相比,具有造价低、工期短、占地空间少、支挡及时快速及安全稳定性好等优点,其综合经济效益显著^[1-5]。工程实践中,对锚杆的允许变形要求较严,不是单纯地以抗拔承载力作为设计标准,而往往是以最大允许变形量作为设计标准。因此对锚杆的受拉变形进行深入系统的研究是很有必要的,具有重大的现实意义。文献[6]中指出:锚固体长度存在一个临界值,当超过这一值时,锚固体长度的增加对提高锚杆的极限承载力意义不大,此临界长度即临界锚固长度。

锚杆的抗拔承载力和变形同时受锚杆材料与周围土体的力学参数以及锚杆-土体界面的几何特性与材料物理特性的制约,具有很大的不确定性。荷载传递法是一种研究锚杆荷载-位移曲线特性的行之有效的方法。文献[7]中采用理想弹塑性模型作为锚杆的荷载传递模型。本文中笔者将基于轴向 Winkler 地基模型,利用锚杆和抗拔桩在承载机理和变形特性上的相似性,推导出锚杆变形的计算公式,并在此结果上探讨锚杆临界锚固长度的计算。

1 锚杆的承载机理及变形特性

1.1 承载机理

锚杆的承载机理是:施加于抗拔主筋上的荷载通过主筋与砂浆之间的黏结作用、摩擦作用以及主筋与砂浆之间的机械咬合作用传递到锚固体,然后再由锚固体砂浆与岩土层之间的相互作用将荷载传递到周围的岩土层中。这一过程与一般抗拔桩的荷载传递过程是相似的。

1.2 变形特性

锚杆和抗拔桩在荷载作用下的拉伸变形极为相似,其荷载-位移曲线经历了弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和破坏阶段,曲线在形态上也基本吻合,如图 1 所示。鉴于锚杆和抗拔桩在受力机理和变形特性上的相似性,完全可以考虑在已有抗拔桩变形计算理论的基础上分析和研究锚杆在拉拔荷载作用下的变形。

2 荷载传递模型

假定一根长 L 、锚固体半径为 r_0 的锚杆,在拉

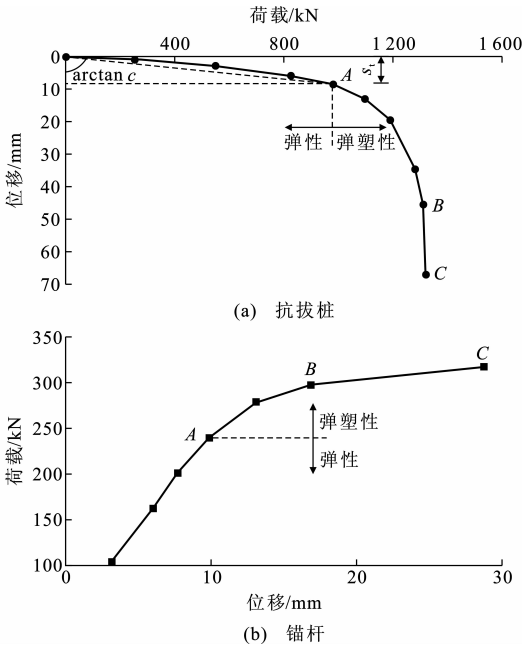


图 1 抗拔桩与锚杆的变形特性比较
Fig. 1 Comparison of Deformation Characteristics Between Uplift Pile and Bolt

拔荷载 P 的作用下,周围土体对其施加一个反向的抗剪力,如图 2 所示。将该模型将周围岩土体的反向作用力看成是由多个离散的刚度系数为 K 的弹簧组成,在弹性变形条件下,各弹簧处于理想弹性状态,符合虎克定律,同时在弹性状态下,锚固体周围一定范围内的连续岩土体参与作用,因此可以考虑通过连续体理论求得弹簧的刚度系数 K 。

在不考虑周围岩土体竖向应力增长的条件,周围岩土体变形采用与抗拔桩相类似的剪

切位移模型^[8-9],见图 3,土体将剪应力和剪切变形传递给相邻单元,并连续地一直传递到很远的 n 倍锚固体直径之外。此时,弹簧的刚度系数 K 可按式(1)计算

$$K/G_s=2\pi/\epsilon \tag{1}$$

式中: G_s 为土体剪切模量; $\epsilon=\ln(r'/r_0)$, r' 为影响半径,根据 Randolph^[10] 的研究结果, r' 与锚杆长度、周围岩土体的弹性模量有关。

在 Randolph 的研究基础上,Mylonakis^[11] 给出了考虑桩周土体内竖向应力条件下 K 的表达式,非

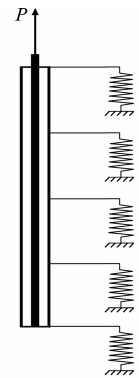


图 2 轴向 Winkler 模型
Fig. 2 Axial Winkler Model

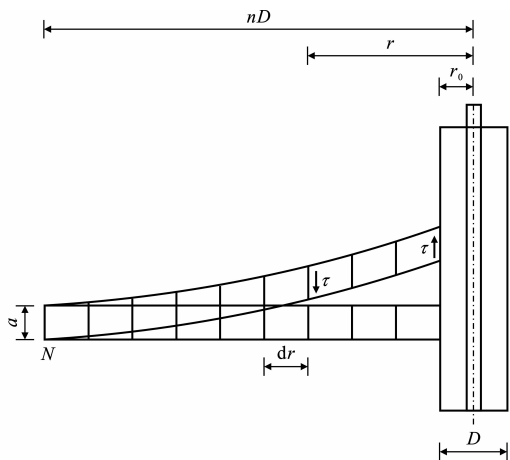


图 3 剪切位移模型

Fig. 3 Shear Displacement Model

线性拟合结果为

$$\frac{K}{G_s} = 1.3 \left(\frac{E}{E_s} \right)^{-0.025} \left[1 + 7 \left(\frac{L}{2r_0} \right)^{-0.6} \right] \quad (2)$$

$$E = \frac{E_a A_a + E_b A_b}{A_a + A_b} \quad (3)$$

式中: E 为锚固体、锚杆的综合弹性模量; E_s 为土体的弹性模量, $E_s = 2(1 + \nu_s)G_s$, ν_s 为周围岩土体的泊松比; E_a 、 A_a 分别为砂浆或锚固剂的弹性模量和面积; E_b 、 A_b 分别为锚杆钢筋的弹性模量和截面积。本文将采用式(2)计算 K 值。

3 锚杆变形计算基本公式的推导

根据第 2 节的荷载传递模型,假设周围为均质岩土体,在深度 z 处取微元,见图 4。

由锚固体处在弹性状态可知

$$\frac{\partial s(z)}{\partial z} = \frac{P(z)}{AE} \quad (4)$$

式中: $A = A_a + A_b$ 。

由单元体平衡得

$$\frac{\partial P(z)}{\partial z} = Ks(z) \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得

$$\frac{\partial^2 s(z)}{\partial z^2} = \frac{1}{AE} \frac{\partial P(z)}{\partial z} = \frac{K}{AE} s(z) \quad (6)$$

式(6)的通解表达式为

$$s(z) = ae^{\mu z} + be^{-\mu z} \quad (7)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{K}{AE}} \quad (8)$$

式中: a 、 b 为待定系数,可以由边界条件式(9)解出

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=0} &= -\frac{P}{AE} \\ \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=L} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式(9)可以解得

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{P}{AE\mu(e^{2\mu L} - 1)} \\ b &= \frac{Pe^{2\mu L}}{AE\mu(e^{2\mu L} - 1)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式(10)代入式(7)整理后得

$$s(z) = \frac{P \cosh[\mu(L-z)]}{AE\mu \sinh(\mu L)} \quad (11)$$

将 $z=0$ 代入式(11)得锚固体顶端位移 s_t 为

$$s_t = \frac{P \coth(\mu L)}{AE\mu} \quad (12)$$

此时

$$\frac{s}{s_t} = \frac{\cosh[\mu L(1-z/L)]}{\cosh(\mu L)} \quad (13)$$

对式(11)进行积分,可得锚杆轴力分布,即

$$\frac{P}{P_t} = \frac{\sinh[\mu L(1-z/L)]}{\sinh(\mu L)} \quad (14)$$

式中: P_t 为锚杆顶端轴力。

由式(12)可知,锚杆 P - s 曲线在弹性变形阶段的斜率 K_p 为

$$K_p = \frac{AE\mu}{\coth(\mu L)} \quad (15)$$

如果加上自由段拉伸变形,则

$$K_p = \frac{1}{\coth(\mu L)(AE\mu)^{-1} + L_f(E_b A_b)^{-1}} \quad (16)$$

式中: L_f 为自由段长度。

4 临界锚固长度计算

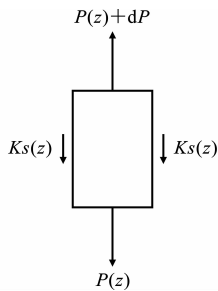
锚杆在工作时段内的塑性变形一般很小^[12],因此笔者认为在线弹性阶段讨论锚杆临界锚固长度也有其实际意义。

图 5 为不同 μL 时锚杆轴力、位移与 z/L 的关系曲线,根据式(13)、(14)给出了在其他已知参数不变,只有锚固长度 L 变化,即 μL 变化时 P/P_t 、 s/s_t 随 z/L 的变化曲线。由图 5 可见,当 $\mu L \geq 4.5$ 时,在锚杆底端无论是轴力还是位移都几乎为 0,同时曲线在锚杆底端的斜率可以由式(13)、(14)求导,所得结果都小于 0.1,说明再增加锚固长度,轴力和位移向下发展的空间已经很小。图 5 中, $\mu L = 6$ 、10 时锚杆底端有很长一段内力和位移都几乎为 0。

由式(2)、(8)可知, μ 亦是 L 的函数,取出式(2)

图 4 锚固体计算微元

Fig. 4 Calculation Unit of Anchor Body



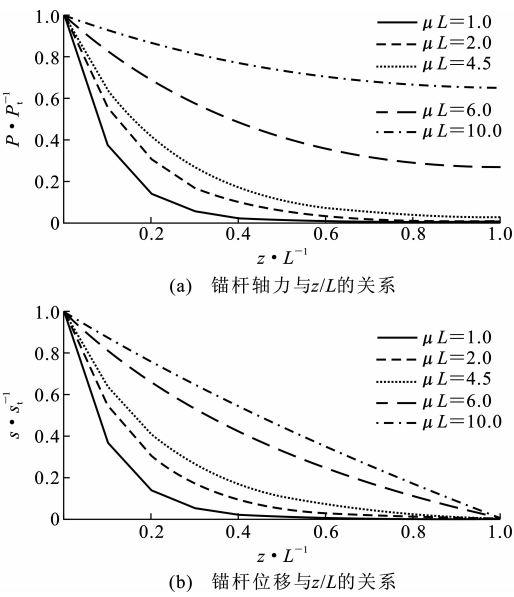


图 5 不同 μL 时锚杆轴力、位移与 z/L 的关系曲线

Fig. 5 Relation Curves Between Axial Forces, Displacements of Bolt and z/L with Different μL

中与 L 有关的部分,令

$$y=7x^{-0.6} \tag{17}$$

对式(17)求导,得 $y'=-4.2x^{-1.6}$,取 $x=20$,即当 $L/(2r_0)=20$ 时, $y'=-0.035$,此时曲线已接近水平,结合式(8)可知,在正常锚杆、土体条件下 $[L/(2r_0)]\geq 20$, μ 对 L 极不敏感,因此从式(15)和双曲余切函数的性质(图 6)也可得出:当 $\mu L\geq 4.5$ 时, $\coth(\mu L)\approx 1$, K_p 接近定值,再次证明了当 $\mu L=4.5$ 时再增加锚固长度对锚杆在弹性阶段的承载能力没有太大意义。因此本文中得到的临界锚固长度表达式为

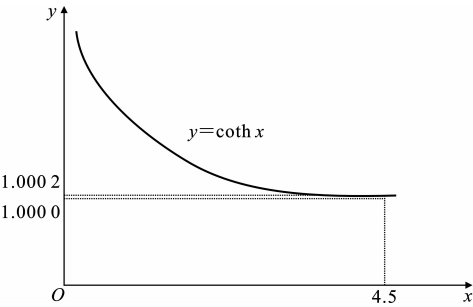


图 6 双曲余切函数曲线

Fig. 6 Curve of Coth-function

$$L_{cr}=\frac{4.5}{\mu_{cr}} \tag{18}$$

式中: μ_{cr} 为临界锚固长度时的 μ 值。临界斜率为

$$K_{pcr}=AE\mu_{cr}=4.5AE/L_{cr} \tag{19}$$

由于 μ 是 L 的函数,所以在求临界锚固长度时需要解方程。本文中 will 用 Matlab 计算 L_{cr} 。

5 工程实例

笔者引用文献[13]中为某高层建筑深基坑支护工程而设计的灌浆锚杆 M_3 为计算实例,有关参数如下:钢筋 $3\Phi 25$, $L=17.5\text{ m}$, $L_f=5.5\text{ m}$, $E_b=2.0\times 10^5\text{ MPa}$, $A_b=14.7\text{ cm}^2$; $A_a=118.0\text{ cm}^2$, $E_a=2.0\times 10^4\text{ MPa}$,综合弹性模量 $E=4\times 10^4\text{ MPa}$,综合面积为 $A=132.7\text{ cm}^2$, $r_0=6.5\text{ cm}$, $E_s=24.5\text{ MPa}$, $\nu_s=0.2$, $G_s=10.2\text{ MPa}$ 。本文计算的 P - s 曲线与实测曲线在弹性阶段的对比如图 7 所示。

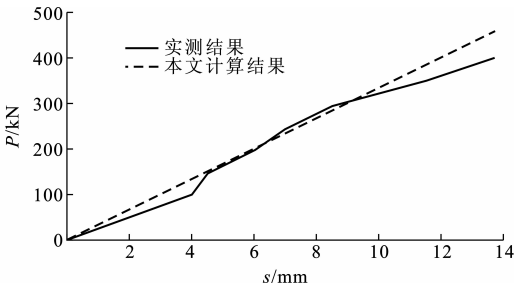


图 7 本文计算结果与实测结果的对比

Fig. 7 Comparison Between Calculating Result and Measured Result

有关参数计算结果为: $K=15.1\text{ MPa}$, $\mu=0.168\text{ 6 m}^{-1}$, $K_p=33.4\text{ kN}\cdot\text{mm}$ 。结果表明:本文计算结果与实测结果拟合良好。临界锚杆长度计算结果为 $L_{cr}=27.5\text{ m}$,较为合理。

6 结 语

- (1)基于轴向 Winkler 地基模型和剪切位移模式,导出锚杆的荷载-位移关系的理论解,并引用工程实例将之与本文解进行比较。
- (2)基于导出的荷载-位移关系,得出临界锚固长度的计算公式,引用工程实例并利用本文公式计算锚杆的临界锚固长度。
- (3)本文公式计算结果与实测结果吻合良好,临界锚固长度计算结果较为合理。

参考文献:

References:

[1] 陈建勋,姜久纯,王梦恕.黄土隧道网喷支护结构中锚杆的作用[J].中国公路学报,2007,20(3):71-75.
CHEN Jian-xun,JIANG Jiu-chun,WANG Meng-shu. Function of Rock Bolt of Lattice Girder and Shotcrete Support Structure in Loess Tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(3):71-75.

- [2] 卓 静,李唐宁.波形齿夹具锚和U型箍锚固作用的力学机理[J].中国公路学报,2007,20(3):48-53.
ZHUO Jing, LI Tang-ning. Mechanical Mechanism of Anchorage Effect on Wave-shape-gear-grip Anchor and U-ferrule [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 48-53.
- [3] 易笃韬,邵旭东,李立峰,等.软土地基上桥台桩基受力算法研究[J].中国公路学报,2007,20(5):59-64.
YI Du-tao, SHAO Xu-dong, LI Li-feng, et al. Research on Algorithm for Mechanics of Abutment Pile Foundation on Soft Ground [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 59-64.
- [4] 冯振宇,王忠民,樊丽俭.粘弹性点支承粘弹性桩的动力稳定性分析[J].中国公路学报,2006,19(1):67-70.
FENG Zhen-yu, WANG Zhong-min, FAN Li-jian. Dynamic Stability Analysis of Visco-elastic Pile with Point Visco-elastic Supports [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 67-70.
- [5] 赵明华,肖 燕,陈昌富,等.考虑土体蠕变特性的桥台软基变形分析[J].中国公路学报,2006,19(2):56-61.
ZHAO Ming-hua, XIAO Yan, CHEN Chang-fu, et al. Analysis of Deformation on Soft Subsoil Around Bridge Abutment Considering Soil Creep Property [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 56-61.
- [6] 张乐文,汪 稔.岩土锚固理论研究之现状[J].岩土力学,2002,23(5):627-631.
ZHANG Le-wen, WANG Ren. Research on Status Quo of Anchorage Theory of Rock and Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 627-631.
- [7] 魏新江,危 伟,张世民.理想弹塑性锚杆拉拔理论分析[J].力学与实践,2006,28(3):56-59.
WEI Xin-jiang, WEI Wei, ZHANG Shi-min. Theoretical Analysis of Bolt Pullout Based on Perfect Elastic-plastic Model [J]. Mechanics and Engineering, 2006, 28(3): 56-59.
- [8] GUO W D, RANDOLPH M F. Rationality of Load Transfer Approach for Pile Analysis [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 23(1/2): 85-112.
- [9] 黄 峰,李广信,吕 禾.砂土中抗拔桩位移变形的分析[J].土木工程学报,1999,32(1):31-36.
HUANG Feng, LI Guang-xin, LU He. Analysis of Deformation of Tension Piles in Sandy Soil [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(1): 31-36.
- [10] RANDOLPH M F. A Theoretical Study of the Performance of Piles [D]. Cambridge: University of Cambridge, 1977: 56-77.
- [11] MYLONAKIS G. Winkler Modulus for Axially Loaded Piles [J]. Geotechnique, 2001, 51(5): 455-461.
- [12] 张季如,唐保付.锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J].岩土工程学报,2002,24(2):188-192.
ZHANG Ji-ru, TANG Bao-fu. Hyperbolic Function Model to Analyze Load Transfer Mechanism on Bolts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188-192.
- [13] 陈崇茵,王贤能.抗浮锚杆应力-应变状态的线弹性理论分析[J].岩土力学,2006,27(11):2033-2036.
CHEN Tang-yin, WANG Xian-neng. Linear Elastic Analysis of Stress-strain State of Anti-float Anchor [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2033-2036.

《工业建筑》2009 年征订通知

《工业建筑》由中国钢铁工业协会主管,中冶集团建筑研究院主办,1964 年创刊;重点报道建筑设计、建筑结构、地基和基础、建筑材料、施工技术等方面的应用研究成果及开发技术,突出工业建筑、钢结构、鉴定加固技术等特点;优先报道国家或者省部级自然科学基金资助项目和重大工程建设;内容丰富翔实,理论结合实际;适于土木工程界广大科研、设计、教学、施工等专业技术人员及高校师生阅读。

《工业建筑》为大 16 开本,96 页,彩色胶版印刷,每月 20 日出版,国内外公开发行人。全国各地邮局均可订阅,邮发代号 2-825,也可直接汇款到本编辑部订阅。

《工业建筑》兼营广告,每年八月开始征订下一年广告,收费合理,具有一定规模,是展示企业形象的理想舞台。

地 址:北京市海淀区西土城路 33 号

邮 编:100088

电 话:(010)82227239(兼传真),(010)82227237/8043/8927(编辑),

(010)82227236(发行),(010)82227191/7677/7238/7239(广告)

网 址:www.industrialconstr.cn

E-mail:gyjz@chinajournal.net.cn