

文章编号: 1000-7598-(2003) 02-0198-05

土钉支护中超前锚杆的工作机理研究

屠毓敏

(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 超前锚杆作为土钉基坑支护中的主要抗滑措施, 在现有的土钉墙基坑支护结构设计中, 仅验算其整体稳定性或作为抗滑安全储备。将 Ito and Matsui 所提出的作用于排桩上的土压力理论应用于超前锚杆分析, 研究了超前锚杆在土钉基坑支护中所起的抗滑作用, 提出了带有超前锚杆的土钉墙稳定性分析方法, 并得到工程实例的验证。通过研究可以提高土钉墙的设计理论, 降低工程造价。

关 键 词: 土钉支护; 超前锚杆; 抗滑机理; 整体稳定性分析

中图分类号: TU 753 **文献标识码:** A

Study on working mechanism of forepoling bolts in soil nailing protection

TU Yu-min

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The forepoling bolts are used for major anti-sliding measure in soil nailing retaining and protection of foundation excavation. In the forthcoming design of soil-nailing retaining wall with forepoling bolts, the whole stability is only checked or they are used for safe reserve. This paper applies the theory of earth pressure acting on piles in a row, which had already been derived by Ito and Matsui, to analyze forepoling bolts. The anti-sliding action that the forepoling bolts take in the soil nailing retaining wall is studied. The stability analyzing method for the soil-nailing wall with the forepoling bolts is expounded; and it has been verified by an engineering example. By studying the soil-nailing wall with the forepoling bolts, its design theory will be greatly improved. Meanwhile, engineering cost will be decreased.

Key words: soil nailing protection; forepoling bolts; anti-sliding mechanism; whole stability analysis

1 引 言

土钉支护以充分利用土体的自支承能力为出发点, 通过在土体中按一定的间距和长度设置土钉, 并辅以钢筋网喷射混凝土面层与土体协同工作, 形成一种复合式挡土结构, 弥补了土体抗拉、抗剪强度低的弱点, 同时改变了基坑(或土坡)的变形和破坏性状, 提高了地基土的整体刚度和稳定性, 确保基坑的稳定。由于土钉墙具有造价低廉、施工迅捷、支护质量高、能适用于多种地质条件等优点, 已在基坑支护和边坡加固中得到工程界的青睐。但是, 在松散的砂土、软粘土及地下水丰富的土层中应用时, 常因土层不能对土钉提供足够的抗拔力而难于实施。尤其在饱和软粘土层中, 由于地基土的自承载能力差, 难于形成开挖边坡面层, 为此, 在

软土地基中使用土钉支护受到一定的限制。为弥补软弱地基自支承能力低的弱点, 目前, 通常采用超前锚杆或复合土钉墙^[1]的结构形式。由于超前锚杆施工便捷、速度快, 而且能有效地降低土体变形, 增加基坑的稳定性, 这已在软弱地基的基坑支护中得到广泛应用。但就目前土钉墙设计而言, 大都未能考虑超前锚杆的抗滑作用, 在工程设计中仅作为安全储备之用, 或仅验算其整体稳定性, 设计理论已滞后于工程实践, 鉴于此, 本文从桩土相互作用的机理出发, 分析研究超前锚杆在土钉基坑支护中的工作机理, 以认识超前锚杆在土钉支护中的抗滑作用。

2 超前锚杆受力分析

对于位于软弱地基中的基坑工程, 当开挖深度

收稿日期: 2002-02-25

作者简介: 屠毓敏, 男, 1965 年生, 硕士, 副教授, 从事地基加固、基坑支护等方面的教学和科研工作。

较深时, 常采用超前锚杆来提高土钉墙基坑支护结构的稳定性, 在基坑开挖到一定深度时, 通过设置垂直注浆花管、小直径钢管 (一般直径为 159 mm) 或松木桩等来实施, 设计超前锚杆应穿过最危险滑动面, 并有足够的深度进入稳定土层中, 其顶部与土钉钢筋 (或钢管) 焊接, 其典型剖面如图 1 所示。

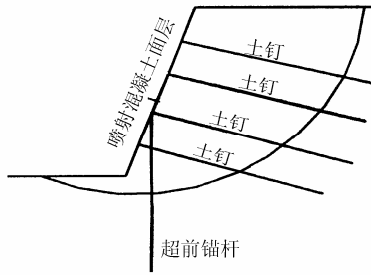


图1 土钉墙结构剖面图

Fig.1 Profile of soil-nailing wall structure

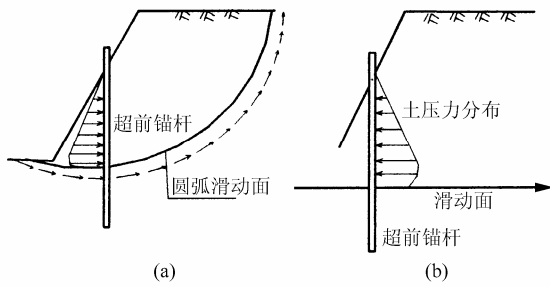


图2 超前锚杆抗滑作用

Fig.2 The anti-sliding action of the forepoling bolts

2.1 作用于超前锚杆上的侧向土压力

土钉在土钉墙中主要通过土体与锚固体之间的摩擦力所提供的抗拔力来提高土钉墙的整体稳定性^[2, 3], 然而, 超前锚杆的作用有别于土钉的作用, 在土钉支护中, 由于超前锚杆的存在, 一方面, 对滑动土体起着阻止遮帘作用 (如图 2 (a)), 另一方面, 滑动土体对超前锚杆也存在着侧向土压力的作用 (如图 2 (b)), 由于超前锚杆之间存在着一定的间距, 作用在超前锚杆上的土压力与朗肯土压力存在较大的差异。Ito and Matsui^[4](1975 年)曾将土和桩分别作为 Mohor-Coulomb 材料和刚性体, 考虑软弱土体从排桩间产生挤出的塑性变形, 利用土的塑性理论建立了位于边坡中的排桩承受边坡滑动时的极限侧向土压力, 并用室内模型试验进行了验证^[4, 5]。这对超前锚杆在土钉支护中极限抗滑设计具有指导作用。为此, 本文利用 Ito and Matsui 的研究成果, 将其应用于土钉支护中的超前锚杆的抗滑作用分析, Ito and Matsui 所提出的作用于排桩上的侧向

土压力的计算式为

$$p(z) = cD_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \cdot \right. \\ \left. \left[\exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right] + \right. \\ \left. \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left[D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - \right. \\ \left. - 2D_2 N_\phi^{-1/2} \right] + \frac{\gamma z}{N_\phi} \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \exp \left[\frac{D_1 - D_2}{D_2} \cdot \right. \right. \\ \left. \left. N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right] - D_2 \right] \quad (1)$$

式中 $N_\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$; D_1 、 D_2 分别为超前锚杆之间的中心距及净距; c 、 ϕ 为地基土的抗剪强度指标; γ 为地基土的重度。

2.2 超前锚杆受力分析

由图 2 中超前锚杆的抗滑作用可知, 超前锚杆可按侧向受载桩的方法进行分析, 取滑动面为坐标原点, 向下为坐标轴的正方向, 则其挠曲线方程为

$$\left. \begin{aligned} E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} - p(z) &= 0, & (-H \leq z \leq 0) \\ E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + K_h D y &= 0, & (0 \leq z \leq Ld) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 E_p 、 I_p 为超前锚杆的抗弯刚度; K_h 为地基反力系数(kN/m^3); D 为超前锚杆的直径; 其余符号如图 3 所示。

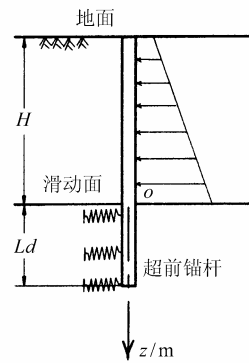


图3 超前锚杆受力分析

Fig.3 Forcing analysis of the forepoling bolts subject to lateral force

由式 (1) 可知, $p(z)$ 为 z 的一次函数, 其表达式可简化为

$$p(z) = (f_1 + f_2 z) / D_1 \quad (3)$$

令

$$\alpha^4 = K_h D / E_p I_p \quad (4)$$

则式 (2) 的通解为

$$\left. \begin{aligned} y &= a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + \frac{f_1}{24E_p I_p} z^4 + \frac{f_2}{120E_p I_p} z^5 \\ &\quad (-H \leq z \leq 0) \\ y &= e^{-\alpha z} (a_4 \sin \alpha z + a_5 \cos \alpha z) + \\ &\quad e^{\alpha z} (a_6 \sin \alpha z + a_7 \cos \alpha z) \\ &\quad (0 \leq z \leq Ld) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于超前锚杆顶部一般均与土钉钢筋(或钢管)焊接, 则其边界条件为

$$\left. \begin{aligned} E_p I_p \frac{d^2 y}{dz^2} \Big|_{z=-H} &= 0; & E_p I_p \frac{dy^2}{dz^2} \Big|_{z=Ld} &= 0; \\ E_p I_p \frac{d^3 y}{dz^3} \Big|_{z=-H} &= k_T y \Big|_{z=-H}; & E_p I_p \frac{d^3 y}{dz^3} \Big|_{z=Ld} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中 k_T 为土钉的水平刚度系数, 可按式(3)计算^[3]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \alpha & -\alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \alpha^2 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & -\alpha^3 & -\alpha^3 \\ 0 & 0 & 2 & -6H & 0 & 0 \\ K & -KH & KH^2 & 6-KH^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tan\beta & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\tan\beta & 1+\tan\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -\alpha & -\alpha \\ 0 & -\alpha^2 \\ \alpha^3 & \alpha^3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -e^{2\beta} \tan\beta & e^{2\beta} \\ -e^{2\beta} (1+\tan\beta) & -e^{2\beta} (1-\tan\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中 b_1 、 b_2 为:

$$b_1 = -\frac{f_1}{2E_p I_p} H^2 + \frac{f_2}{6E_p I_p} H^3 \quad (10)$$

$$b_2 = \frac{f_1}{E_p I_p} H - \frac{f_2}{2E_p I_p} H^2 - \frac{Kf_1}{24E_p I_p} H^4 + \frac{Kf_2}{120E_p I_p} H^5 \quad (11)$$

求得 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 、 a_7 后, 可以求得作用于超前锚杆上的弯矩和剪力, 其弯矩分布为

$$\begin{aligned} M(z) &= -E_p I_p (2a_2 + 6a_3 z) - \frac{f_1}{2} z^2 - \frac{f_2}{6} z^3 \\ &\quad (-H \leq z \leq 0) \\ M(z) &= -2\alpha^2 E_p I_p [e^{-\alpha z} (a_4 \sin \alpha z - a_5 \cos \alpha z) + \\ &\quad e^{\alpha z} (-a_6 \sin \alpha z + a_7 \cos \alpha z)] \quad (0 \leq z \leq Ld) \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 超前锚杆嵌固深度的确定

超前锚杆在土钉支护中所起的作用主要是提高土钉墙基坑支护结构的整体稳定性, 为此, 超前锚杆应有足够的深度以维持其整体稳定性, 其嵌固深度可按圆弧滑动简单条分法确定, 当最危险滑动

$$k_T = \frac{3E_c A_c}{3l_f + l_a} \cos^2 \theta \quad (7)$$

式中 A_c 、 E_c 为锚固体截面面积和复合弹性模量; l_a 、 l_f 为土钉锚固段和非锚固段长度; θ 为土钉水平倾角。

超前锚杆在 $z=0$ 处的连续性条件为

$$\left. \begin{aligned} y(0-) &= y(0+) \\ y'(0-) &= y'(0+) \\ y''(0-) &= y''(0+) \\ y'''(0-) &= y'''(0+) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据超前锚杆的边界条件和连续性条件可求得待定系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 、 a_7 , 令 $K = k_T / (E_p I_p)$, $\beta = \alpha Ld$, 则其矩阵表达式如式(9)。

面穿过超前锚杆的底端时, 其最小安全系数应满足《规程》^[3]所规定的要求。

3 超前锚杆抗滑作用分析

由上可知, 超前锚杆在土钉支护中的抗滑作用是通过超前锚杆与土体之间的相互作用来实现的。为此, 超前锚杆在土钉基坑支护中的抗滑作用分析可按如下方法进行: 首先, 按《规程》方法求出无超前锚杆时的土钉墙的最危险滑动面及最小安全系数; 其次, 按 2.3 方法确定超前锚杆的嵌固深度; 再次, 按式(1)求出作用于超前锚杆上的侧向土压力 $p(z)$; 最后, 求出一 $p(z)$ 对最危险滑动面所提供的抗滑力矩, 并求出设置超前锚杆时的最小安全系数, 若最小安全系数不能满足《规程》的要求, 则应调整超前锚杆的直径和间距, 直至满足。

4 工程应用

4.1 工程概况

某一基坑开挖深度为 6.0 m, 位于软粘土地基中, 基坑开挖区内地基土的主要物理力学性指标如表 1 所示。

表 1 场地土的主要物理力学性指标
Table 1 Physical and mechanical property of field soil

土层名称	层厚 / m	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	凝聚力 / kPa	内摩擦角 / ($^{\circ}$)
淤泥	6.0	17.0	6.0	12.0
淤泥质粘土	10.0	17.8	12.0	20.0

在土钉墙设计时, 取淤泥和淤泥质粘土与土钉锚固体之间的极限摩阻力分别为 16, 20 kPa, 土钉采用钢管击入钉, 长度均为 9.0 m, 水平间距为 1.0 m, 其结构剖面如图 5 所示。

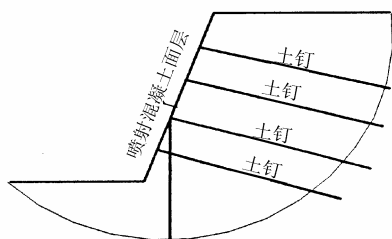


图 4 超前锚杆嵌固深度计算简图

Fig.4 Calculating sampled graanchorage depth of forepoling anchor bolts

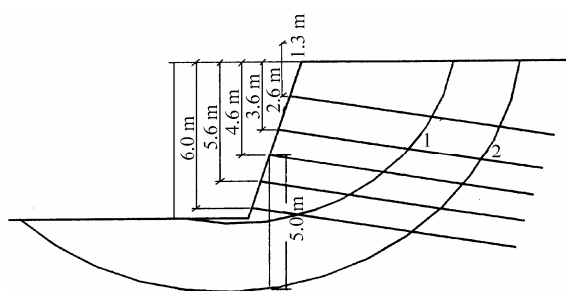


图 5 土钉墙结构布置图

Fig.5 Soil-nailing wall arranging graph

4.2 土钉墙整体稳定性分析

根据《规程》的要求, 对图 5 中的土钉墙进行整体稳定性分析。图中圆弧 1 为无超前锚杆时的最危险滑动面, 此时的最小安全系数为 1.032, 圆弧 2 为设置超前锚杆时的最危险滑动面, 此时的最小安全系数为 1.454, 由此可见, 就本工程基坑而言, 当无超前锚杆时, 土钉墙处于极限滑动状态, 其整体稳定性不能满足《规程》的要求, 而当设置长度为 5.0 m 的超前锚杆时, 其整体稳定性能满足《规程》

所规定的要求, 说明超前锚杆的入土深度能满足土钉墙的整体稳定性要求。

4.3 超前锚杆的抗滑作用分析

土钉墙的整体稳定性分析, 仅能说明超前锚杆已具有足够的入土深度能满足《规程》的要求。而至于超前锚杆在土钉支护中的抗滑作用, 则应从超前锚杆与地基土的相互作用来分析。

取超前锚杆的直径为 0.1 m, 其间距为 1.0 m, 则作用在超前锚杆上的土压力如图 6 (a) 所示, 对最危险滑动面 (如图 5 中圆弧 1) 所提供的抗滑力矩为 20.906 $\text{kN} \cdot \text{m}$, 此时的最小安全系数为 1.115, 显然不能满足《规程》的要求, 则应调整超前锚杆的间距和直径。若超前锚杆的直径不变, 其间距调整为 0.5 m, 则作用在超前锚杆上的土压力如图 6 (b) 所示, 对最危险滑动面 (如图 5 中圆弧 1) 所提供的抗滑力矩为 90.606 $\text{kN} \cdot \text{m}$, 此时的最小安全系数为 1.388, 能满足《规程》的要求。

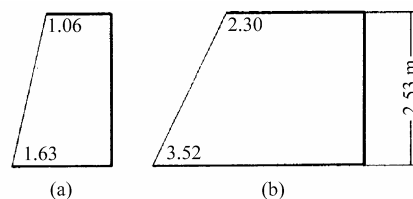


图 6 作用于超前锚杆上的土压力

Fig.6 Lateral earth pressure acting on forepoling bolts

4.4 超前锚杆受力分析

由式 (7) 可求得作用于超前锚杆上的弯矩, 其剪力也可同样求得, 则作用于超前锚杆上的弯矩和剪力分布如图 7 所示, 由图可得其最大弯矩值为 2.07 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。若超前锚杆注浆体的强度为 C20, 注浆钢管采用 $\phi 48 \times 3.5 \text{ mm}$, 则由《混凝土结构设计规范》^[7] 可求得超前锚杆的弯矩设计值为 2.146 $\text{kN} \cdot \text{m}$, 能满足设计要求。

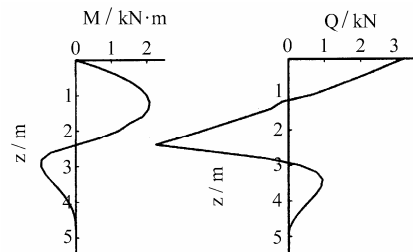


图 7 超前锚杆内力分布

Fig.7 Internal force distribution of the forepoling bolts

4.5 土钉墙位移分析

在土钉墙施工过程中,对超前锚杆顶部进行水平位移观测,实测水平位移为 21.2 mm,而由文中方法计算得超前锚杆顶部的最大水平位移为 24.4 mm,由此可知,实测位移比理论位移大 15.1 %。

5 结 语

本文从超前锚杆与地基土的相互作用机理出发,研究了超前锚杆在土钉基坑支护中所起的抗滑作用,并得到了工程实例的验证。

研究表明,超前锚杆在土钉基坑支护中首先应有足够的入土深度以满足其整体稳定性要求,其抗滑作用是通过超前锚杆与地基土的相互作用力来实现的,为此,可以调整超前锚杆的间距或直径以满足土钉墙的稳定性的要求。

参 考 文 献

- [1] 李象范,徐水根. 复合型土钉挡墙的研究[J]. 上海地质, 1999 (3): 1—11.
- [2] 陈肇元,崔京兆. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 12.
- [3] JGJ120-99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [4] Ito T, Matsui T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. **Soils and Foundations**, 1975, 15(4): 43—59.
- [5] Tanotsu Matusi, Won Pyo Hong and Tomio Ito Earth Pressures on Piles in a Row due to Lateral Soil Movements[J]. **Soils and Foundations**, 1982, 22(2), 71—80.
- [6] 屠毓敏,魏汝龙. 曲桩竖向承载力的确定[J]. 土木工程学报, 1999, (4): 64—68.
- [7] GBJ10-89, 混凝土结构设计规范[S].