

预应力锚杆柔性支护法的研究与应用

贾金青, 郑卫锋

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 预应力锚杆柔性支护是一种新型的深基坑支护技术。本文对其基本构成与主要特点进行了阐述, 对基坑的破坏模式进行了研究和概括, 基于极限平衡理论进行了公式的推导。通过数值分析, 对其变形与滑移场进行了研究, 并与相同条件下的土钉支护进行了比较。通过实际工程的应用, 进一步验证了该方法的优越性: 基坑变形小, 特别适用于超深基坑的支护。

关键词: 预应力锚杆; 柔性支护; 深基坑; 数值分析

中图分类号: TU 443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)11-1257-05

作者简介: 贾金青(1962-), 男, 河北沧州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程、地基处理等领域的研究与工程应用。

Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor

JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new retaining method for deep excavation flexible retaining method with prestressed anchor has been developed by the authors. The basic composition and the main characteristic of this new method were studied of, and the failure patterns of excavations were described. Based on the limit equilibrium theory, the formular of stability analysis was carried out. Subsequently, deformation and critical sliding zone were analyzed with finite difference method. The calculated results were compared with the soil-nailed support system. Finally, applicability of this new method to practical design works was demonstrated. Its advantages such as small displacements and application to super-deep excavations were investigated.

Key words: prestressed anchor; flexible retaining; deep excavation; numerical analysis

0 前言

预应力锚杆柔性支护是应用于基坑开挖和边坡稳定的一种新型支挡技术, 是由众多小吨位的预应力锚杆与喷射混凝土面层或木板面层结合而成的一种支护方法^[1]。由于强大预应力的作用, 改变了基坑的受力状态, 减小了基坑坑壁位移, 因此预应力锚杆柔性支护法特别适用于位移控制要求严格的基坑及超深基坑的支护^[2]。

1 概述

预应力锚杆柔性支护体系由众多小吨位预应力锚杆(索)、面层、锚下承载结构和排水系统组成, 如图1所示。其中预应力锚杆(索)作为承载体系, 面层与锚下承载结构等构件组成构造体系, 排水系统作为辅助体系, 由承载体系、构造体系与辅助体系共同组成预应力锚杆柔性支护体系。

预应力锚杆分为自由段和锚固段, 其中锚固段设

置于潜在滑移面以外的稳定土体中。面层是预应力锚杆柔性支护体系中必不可少的组成部分, 常常采用挂钢筋网喷射混凝土, 或将木板与喷射混凝土结合共同作用。面层的主要作用在于承受土体压力及水压力, 并将其传递至锚下承载结构进而传递到预应力锚杆上; 同时围护承载体系间土体的稳定, 使其不至于塌落。由于面层厚度较薄, 相对于传统的桩锚支护、地下连续墙等结构而言, 其刚度要小得多, 柔性大, 这就是称之为预应力锚杆柔性支护体系的缘由。

锚下承载结构简称锚下结构, 是预应力锚杆柔性支护法的重要组成部分。在锚杆上施加的预应力通过锚下承载结构传递至需要锚固的岩土体上。锚下结构通常由型钢(工字钢、槽钢)、垫板、锚具组成。型钢可竖直分段放置, 也可水平多跨连续放置或通长连续

基金项目: 建设部2005年科学技术研究开发资助项目(05-K1-25);

大连在建委科技计划资助项目(2004-03-01)

收稿日期: 2005-02-28

放置。

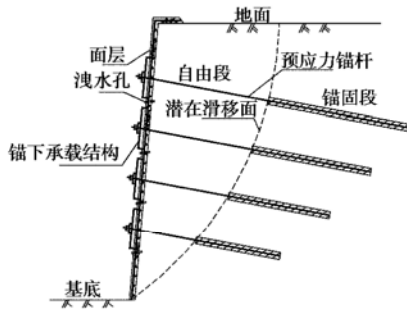


图1 预应力锚杆柔性支护法基本构成

Fig. 1 Construction of flexible retaining method with prestressed anchor

排水系统，通常设置地面排水沟，将地表水排走，防止地表水渗透到土体中。在地下水以下的坑壁上设泄水孔，以便将喷射混凝土面层背后的水排走。在基坑底部应设排水沟和集水坑，必要时采用井点降水法降低地下水水位。

2 设计计算

对支护结构的设计计算，在理论分析上主要采用极限平衡法，此方法需要假定各种可能的破坏面位置，从中寻找临界破坏面，并满足规定的安全系数的要求。

2.1 破坏模式分析

基坑破坏模式在一定程度上揭示了基坑破坏形态和破坏机理，因此可以说是稳定分析的基础。稳定分析对破坏模式的合理选择具有依赖性^[3]。

如图2所示，基坑的破坏模式主要有以下四种：其中圆弧破坏模式常发生在土质基坑和有破碎结构或散体结构的风化岩基坑中；折线破坏模式发生在土质基坑中有不规则的可能滑动面 - 折线滑动面存在的场合，通常在该滑动面的下部为基岩或硬土层；平面破坏模式常发生在层状岩体中或岩石为非层状岩体但存在软弱结构面的基坑中；而圆弧 - 平面复杂破坏模式常发生在上部为杂填土层或一般土层，下部为层状岩层的基坑中。

2.2 稳定性分析

所谓稳定分析是按照基坑的某一种破坏形态和破坏机理，根据岩土工程条件、荷载条件以及支护工况所进行的定量的受力平衡分析。将传统的用于边坡稳定分析的极限平衡法用于基坑稳定分析时，除考虑岩土体的力学指标外，尚应考虑锚杆预应力的作用。如图3所示，假定基坑的破坏模式为平面破坏，其机理是自重及附加荷载作用下岩土体内产生的剪应力超过层状结构面的抗剪强度而导致不稳定岩土体作顺层滑动^[4]。

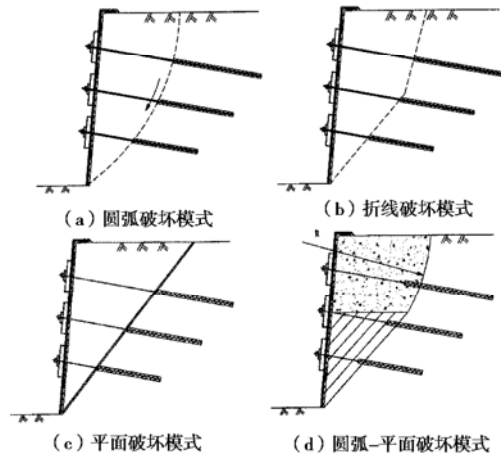


图2 基坑失稳破坏模式

Fig. 2 Failure patterns of excavation

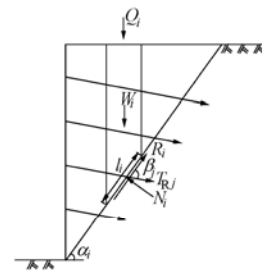


图3 土条受力分析

Fig. 3 Mechanical analysis of soil wedge

设有 m 层锚杆，将滑动土体分为 n 条，取单位宽度的条块 i 进行受力分析，作用于条块 i 上的力有土体自重 W_i 、地面超载 Q_i 、法向反力 N_i 、切向力 R_i 与锚杆的极限承载力 T_{Rj} 。

基坑的稳定安全系数 k 定义为破坏面上的抗滑力 S_f 与下滑力 S 之比，根据法向力平衡和切向力平衡条件，可得

$$k = \frac{S_f}{S} =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n [(W_i + Q_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i] + \sum_{j=1}^m \left[\frac{T_{Rj}}{S_H} (\sin \beta_j \tan \varphi_i + \cos \beta_j) \right] + \Delta_T}{\sum_{i=1}^n [(W_i + Q_i) \sin \alpha_i]}$$

式中 α_i 为破坏面与水平面的夹角； φ_i 、 c_i 为土体的内摩擦角与粘聚力； l_i 为土条 i 的底边长； S_H 为锚杆间的水平间距； β_j 为第 j 层锚杆与破坏面的夹角。

与土坡稳定分析的瑞典条分法相比，上式的分子中多了三项：

$$S'_f = \sum_{j=1}^m \left[\frac{T_{Rj}}{S_H} (\sin \beta_j \tan \varphi_i + \cos \beta_j) \right] + \Delta_T,$$

其中，前二项为由锚杆的极限承载力所产生的抗滑因素，第三项为由于锚杆预应力的作用而改善岩土体的力学性能的影响效应，在设计时，无法量化其影响，

仅作为安全储备考虑。

2.3 锚杆承载力计算分析

锚杆计算时一般不计其抗剪、抗弯作用, 假定锚杆为受拉工作状态。锚杆的承载力取决于以下三种破坏: 锚杆杆体强度破坏; 锚固体从岩土中拔出破坏; 锚下承载结构破坏。锚杆的极限承载力直接取用以下三式中较小者:

$$(1) \text{ 杆体抗拉承载力: } T_1 = \frac{\delta}{4} d^2 f_{yk};$$

$$(2) \text{ 锚杆抗拔承载力: } T_2 = \delta D l_a \tau_k \gamma;$$

$$(3) \text{ 锚下结构承载力: } T_3 = \min(R_1, R_2, R_3)。$$

式中 d 、 f_{yk} 为锚杆杆体的直径和强度标准值; D 、 l_a 为钻孔的直径和锚固段长度; τ_k 为锚固体与岩土体间摩擦力; γ 为影响系数, 通常取 1.2, 主要考虑岩土体摩擦力的离散性大, 在相同安全系数下比其它两项承载力的可靠程度差, 因此适当增加一些安全储备; R_1 为锚下冲剪强度, 按《混凝土结构设计规范》计算; R_2 为锚具抗拉强度, 根据螺杆直径计算其强度, 对于锚索则有相对应的锚具; R_3 为锚下承载体的承载力, 由型钢的强度和稳定计算确定。

3 数值分析

用于基坑稳定性分析的极限平衡分析方法, 不能得到任何有关变形的信息。在深基坑开挖过程中, 基坑周围水平位移和沉降是不可避免的。当基坑周围有建筑物或市政设施时, 控制基坑变形显得尤为重要, 因此, 要对基坑开挖引起变形进行分析和预测。基坑开挖数值模拟计算分析可对基坑支护的受力、变形及破坏模式等力学行为进行较全面的分析研究, 可为基坑工程的设计和施工提供指导, 提供优化设计方案^[5]。

数值计算方法用于岩土工程问题的分析已很普遍, 但其有效性和可靠性经常受到质疑。由于地基土体的复杂性和不确定性, 数值计算方法用于岩土工程问题的确有一定的困难, 主要在于土的本构模型(包括模型参数)的确定。

以大连某深基坑工程为例, 应用二维有限差分计算程序对预应力锚杆柔性支护法的力学行为进行数值模拟研究, 为了便于比较分析, 同时也给出相同条件下土钉支护的计算结果, 具体的土体参数及模型的建立详见文献[1]。

3.1 基坑的位移分布

预应力锚杆支护下基坑水平位移呈曲线分布, 位移最大值发生在基坑顶面, 随深度的增加而逐渐减小。从图 4 中可以得出, 相同条件下土钉支护的水平位移远大于预应力锚杆支护产生的水平位移, 土钉支护的位移是 68 mm, 预应力锚杆支护的最大水平位移仅为

26 mm。

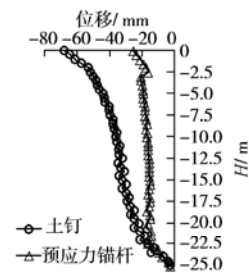


图 4 基坑的水平位移

Fig. 4 Horizontal displacements of excavation

预应力锚杆支护下基坑地表沉降分布如图 5 所示, 基坑地表沉降沿地表水平方向呈曲线分布, 坑壁处最大, 沿远离坑壁方向逐渐减小。土钉支护条件下基坑坑壁的最大沉降量为 56 mm, 而预应力锚杆支护条件下基坑坑壁的沉降量仅为 21 mm。

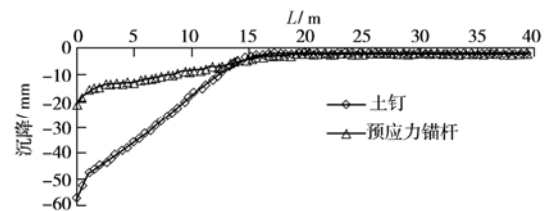


图 5 基坑的地表沉降

Fig. 5 Vertical displacements of excavation

根据上述分析可知, 预应力锚杆支护对基坑位移的控制是很有效的, 因此该方法可用于对位移要求严格的深基坑支护工程。

3.2 预应力大小对基坑变形的影响

如图 6 所示, 在相同条件下, 基坑水平位移随预应力的增加而变小。预应力值等于零时, 基坑最大水平位移 70 mm; 当预应力施加至 100 kN 时, 最大水平位移减小至 47 mm; 当预应力施加至 200 kN 时, 最大水平位移减小至 33 mm, 位移减幅比较大; 但预应力值大于 300 kN 时, 随预应力增大位移减小的幅度变小, 即预应力超过一定值后对限制基坑位移的效果不明显, 但此时的位移值已比较小, 能满足工程的要求。由此可见, 锚杆的预应力大小对基坑位移的影响是很大的。

3.3 预应力大小对基坑滑移场的影响

从理论上讲, 由于锚杆预应力的存在, 减小了基坑坑壁位移, 约束了岩土体的滑动, 减小了岩土体的剪切变形, 当然也减小了潜在滑动面上岩土体的剪切变形, 延缓岩土体塑性区的发生, 缩小了潜在滑移区的范围。

图 7 为不同预应力值条件下基坑的滑移场, 从图中可以看出, 随着锚杆预应力值的增加, 潜在滑移面

上剪切应变减小, 滑移区变小, 当预应力大于 500 kN 后, 滑移区大范围消失, 只在基坑底隅处尚有小范围存在。因此锚杆的预应力不仅减小了基坑变形, 缩小于基坑岩土体塑性区的范围, 延缓或阻止了岩土体潜在滑动区的出现。

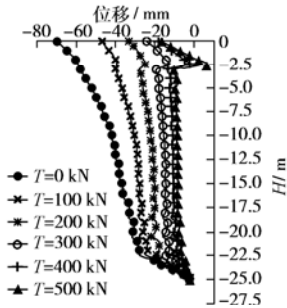


图 6 不同预应力条件下基坑的水平位移

Fig. 6 Horizontal displacements of excavation under different prestress

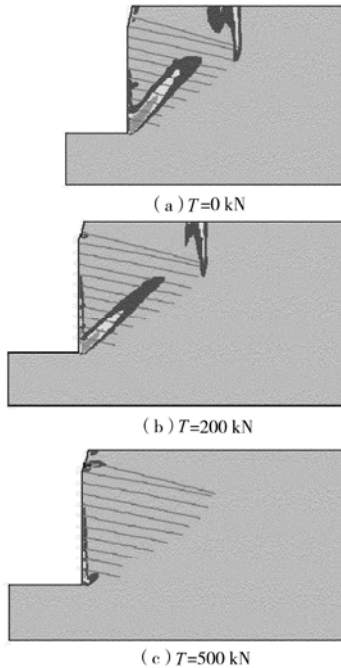


图 7 不同预应力条件下基坑的滑移场

Fig. 7 Distribution of critical sliding zone under different prestress



图 8 土钉支护条件下基坑的滑移场

Fig. 8 Distribution of critical sliding zone under soil-nailed support system

图 8 给出了相同条件下土钉支护的基坑滑移场分布。在土钉支护情况下, 滑移区范围比无支护状态略

小, 但也基本相互连通, 但此种情况下基坑位移已很大, 因此土钉支护很难保证基坑的稳定性, 破坏的形态为基坑上部开裂下部滑动。由此可见, 土钉支护用于超深基坑是值得探讨的^[6]。

4 工程实例

大连远洋大厦深基坑支护工程, 1995 年开始施工。该基坑是目前国内采用预应力锚杆柔性支护法最深的基坑, 深度高达 25.6 m。多数学者认为, 对超深基坑支护采用柔性支护是不安全的, 一是基坑自身的稳定问题, 二是过大的基坑位移将危及周围建筑的安全。传统的桩锚支护方法固然能满足基坑稳定及位移要求, 但其施工工期和工程造价是业主不愿接受的。预应力锚杆柔性支护法在大连远洋大厦超深基坑支护中的成功应用, 为超深基坑支护方法提供了有力的借鉴。

根据地质勘探资料, 场区地层主要由第四系松散堆积物和基岩组成, 自上而下主要有: 杂填土、残积土、强风化板岩、中风化板岩及中风化辉绿岩。

预应力锚杆柔性支护设计的典型剖面如图 9 所示。该段基坑的开挖深度为 25.6 m, 自上而下共设置 11 排锚杆, 锚杆长 5.0~20.0 m, 竖向间距 2 m, 水平间距 1.6 m, 锚杆孔径 ϕ 130 mm, 注浆采用 M25 水泥砂浆, 锚杆采用高强度低松弛钢绞线, 在基坑边坡表面绑扎钢筋网 ϕ 6@200 mm, 喷射混凝土 (厚 100 mm), 喷射混凝土的厚度为 100 mm。锚下承载结构采用 10 号和 14 号槽钢, 锚杆通过锚下承载结构与混凝土面层连接。

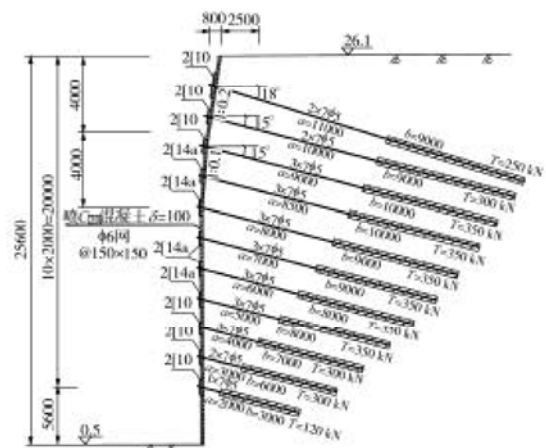


图 9 基坑剖面布置图

Fig. 9 Profile of excavation

5 结 语

本文阐述了预应力锚杆柔性支护法的概念, 无论在理论设计及数值计算上, 还是实际工程中的应用,

都体现了该方法的优越性, 其优点主要体现在: ①工程造价低; ②施工方便、工期短; ③基坑变形小; ④施工简单、安全性好。

(1) 基于极限平衡理论, 得到了预应力锚杆作用下基坑稳定的计算公式。

(2) 预应力锚杆支护下基坑水平位移和垂直位移(沉降)均呈曲线分布。水平位移最大值发生在基坑顶面, 随深度的增加而逐渐减小; 基坑地表沉降最大值发生在坑壁处, 随背离坑壁距离的增大而逐渐变小。但其位移值均小于相同条件下土钉支护的位移值。

(3) 锚杆的预应力大小对基坑位移影响是很大的。随着锚杆预应力的增加, 基坑位移大幅减小, 但预应力达到一定值后对基坑位移改善的幅度已不再显著。

(4) 锚杆的预应力对基坑滑移场产生的影响很大。随着锚杆预应力的增加, 基坑潜在滑移区不断缩小; 当预应力达到一定值时滑移区变得很小, 甚至消

失。因此, 锚杆的预应力值对基坑的稳定是有积极作用的, 至于对基坑稳定定量分析有待深入的研究。

参考文献:

- [1] 贾金青. 预应力锚杆柔性支护法研究[M]. 北京:清华大学, 2003.
- [2] 贾金青, 宋二祥. 一种基坑侧壁的柔性支护方法[P]. 中华人民共和国:02130834.9, 2004.
- [3] 曾宪明. 土钉支护工法的理论与实践[M]. 大连:大连理工大学, 2001.
- [4] JGJ 120—99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [5] 范益群. 地下工程深基坑施工过程安全性分析若干理论问题研究及其工程应用[D]. 大连:大连理工大学, 1998.
- [6] 张明聚. 土钉支护工作性能的研究[D]. 北京:清华大学, 2000.

关于本刊短文栏目文章体例和参考文献著录内容调整的通知

为便于国际文献检索系统收录和进行学术交流, 对本刊论文、短文栏目文章的版式体例和参考文献著录内容作如下调整:

(1) 论文和短文栏目文章的版式体例相同, 版式的层次统一为: 中文文题、作者姓名、单位及所属部门、单位地址邮编、摘要、关键词、中图分类号、文献标识码、文章编号、作者简介; 英文文题、作者姓名、单位及所属部门、单位地址邮编、摘要、关键词; 基金项目及编号(首页下注); 正文(按 1 2

3, 1.1 1.2 1.3, (1) (2) (3), a) b) c) 分章节); 参考文献。

(2) 文后参考文献列表中的中文参考文献, 同时在其后括号内标注该文献相应的英文翻译。

敬请作者在投稿和修改本刊的拟选用稿件时, 按照本刊新的体例要求对稿件进行组织补充和修正。

(本刊编辑部)