

文章编号: 1000-7598-(2007)10-2087-04

复合土钉墙支护模型及在深大基坑工程中的应用

张强勇, 向 文

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 土钉墙是用于基坑开挖和边坡稳定的一种挡土结构, 将土钉与预应力锚杆结合形成复合土钉墙结构。根据土钉、预应力锚杆和土体的联合作用机理, 提出钉-锚-土联合作用模型模拟复合土钉墙的支护锚固效应。将该力学模型用于指导设计一深大基坑支护工程, 使基坑支护设计方案得到显著优化, 确保了基坑开挖稳定和周边环境的安全, 基坑支护获得圆满成功。

关 键 词: 复合土钉墙; 钉-锚-土联合作用模型; 深大基坑; 基坑开挖稳定; 周边环境安全

中图分类号: TU 472.99

文献标识码: A

Supporting model of composite soil nailing walls and its application to deep & large foundation pit engineering

ZHANG Qiang-yong, XIANG Wen

(Research Centre of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The soil nailing walls is a kind of retaining structure to stabilize foundation pit and slope. Composite soil nailing walls is formed by combining soil nailing with prestressed anchor bar. According to the interactive mechanism of soil nailing, prestressed anchor bar and soil mass, a jointly interactive model is proposed to simulate supporting and anchoring effect of the composite soil nailing walls. The mechanical model is applied to a deep & large foundation pit which was designed by authors; and the supporting design scheme for the foundation pit has been effectively optimized. Stability of the foundation pit and safety of surrounding environment under excavation state have also been ensured. The supporting for foundation pit has achieved complete success.

Key words: composite soil nailing walls; jointly interactive model for soil nailing and prestressed anchor and soil mass; deep & large foundation pit; stability of foundation pit under excavation state; safety of surrounding environment

1 前 言

土钉墙是用于基坑开挖和边坡稳定的一种挡土结构, 它由被加固土、放置于原位土体中以较密间距排列的细长金属杆件(土钉)及附着于坡面的喷射混凝土面板组成, 形成一个类似重力式的挡土墙, 以此来抵挡墙后传来的土压力和其它作用力, 从而使开挖坡面稳定^[1]。土钉墙与传统支挡结构作用机理不同, 传统支挡结构基于被动制约机制, 即以支挡结构自身的强度和刚度, 承受其后的侧向土压力; 而土钉墙则是由在土体内放置一定长度和密度的土钉体构成的。土钉与土的相互作用, 形成了能大大提高原状土强度和刚度的复合土体, 并能显著提高土体边坡的整体稳定性。土钉墙与其它支护比较起来具有安全经济、技术可靠、施工简便、工

期短暂的显著优点^[2,3]。

对于需要严格控制土体变形的基坑来说, 可将土钉与具有主动约束机制的预应力锚杆联合形成复合土钉墙支护结构, 达到既保证基坑开挖稳定又控制基坑变形的目的^[4-6]。

2 复合土钉墙支护模型

土钉与预应力锚杆结合可充分发挥二者的支护效应。首先通过土钉与土的相互作用, 可大大提高原状土的强度、刚度和边坡整体稳定性; 其次, 通过锚杆给土体施加预应力的主动约束机制, 可改善基坑受力状态并显著提高基坑的变形刚度, 达到有效控制基坑边坡变形的目的。为模拟土钉(锚杆)的支护效应, 目前常将土钉(锚杆)支护作用简化为杆单元处理。杆单元只考虑土钉(锚杆)的轴向

收稿日期: 2005-10-10

作者简介: 张强勇, 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与结构工程的教学、科研、设计和咨询工作。E-mail: qiangyongz@sdu.edu.cn

抗拉(压)作用,而不能模拟土钉(锚杆)与土体的相互作用和其抗剪效应,因而杆单元法模拟的土钉(锚杆)的支护作用甚微,反映不出土钉(锚杆)在实际岩土工程中所揭示的强有力支护效果。对此,本文根据复合土钉墙结构的支护机理,提出图1所示的钉-锚-土联合作用模型^[7]。该模型认为土钉(锚杆)与周围一定范围的土体联合作用,计算时,可将土钉(锚杆)产生的附加刚度迭加到相应土体单元的刚度矩阵中去,以此反映土钉(锚杆)对土体变形的约束作用,而锚杆的预应力则作为一对集中力处理。

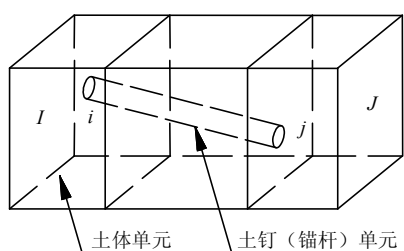


图1 钉-锚-土联合作用模型

Fig.1 Joint interactive model for soil nailing and prestressed anchor bar and soil mass

由图1知,对于隐埋在土体内任意方向的土钉(锚杆) ij ,若已知其方向余弦 l, m, n ,根据有限元理论可知土钉(锚杆)单元的结点平衡方程为

$$[K_e]\{\delta\}^e = \{f\}^e \quad (1)$$

式中: $[K_e]$ 为土钉(锚杆)的单元刚度矩阵; $\{\delta\}^e$ 为单元结点位移列阵; $\{f\}^e$ 为单元结点载荷列阵。

由于土钉(锚杆)两端 i, j 分别隐埋在土体单元 I, J 内,根据有限元插值理论和虚功原理可求得土钉(锚杆)对土体刚度矩阵的“贡献”,这个“贡献”就是由于加钉(加锚)对土体产生的附加刚度矩阵 $[K_e]_a$,其值为

$$[K_e]_a = [N]^T [K_e] [N] \quad (2)$$

式中: $[N]$ 为加钉(加锚)土体单元形函数矩阵,其表达式参见文献[7]。

将附加刚度矩阵 $[K_e]_a$ 迭加到土体单元的刚度矩阵 $[K_e]_s$ 中去,从而得到加钉(加锚)土体单元的刚度矩阵 $[K_e]_c$:

$$[K_e]_c = [K_e]_s + [K_e]_a \quad (3)$$

式中土体单元刚度矩阵 $[K_e]_s$ 表达式如下:

$$[K_e]_s = \int_V [B]^T [D_{ep}] [B] dv \quad (4)$$

式中 $[D_{ep}]_s$ 为土体弹塑性矩阵,表达式见文献[8]。

支护后土体的抗剪强度采用下式^[9]:

$$C_1 = C_0 + \eta \frac{\tau s}{ab} \quad (5)$$

式中: C_0 为支护前土体的黏结力; C_1 为支护后土体的黏结力; τ 为土钉(锚杆)材料的抗剪强度; s 为土钉(锚杆)截面积; a, b 为土钉(锚杆)纵、横向间距; η 为加固系数,一般可取2~4。

3 工程应用

3.1 工程概况

深圳鸿翔花园深大基坑位于深圳市罗湖红岭小区,基坑形状大致成梯形,基坑长270~300 m,宽105~205 m,开挖平均深度12 m,周长850 m,支护面积约10 000 m²。基坑周边环境十分复杂,四周分布有大量多层浅基建筑,并且周边市政道路下分布有燃气管、雨水管、污水管、给水管和通讯管等多种地下管网。图2为基坑平面图。

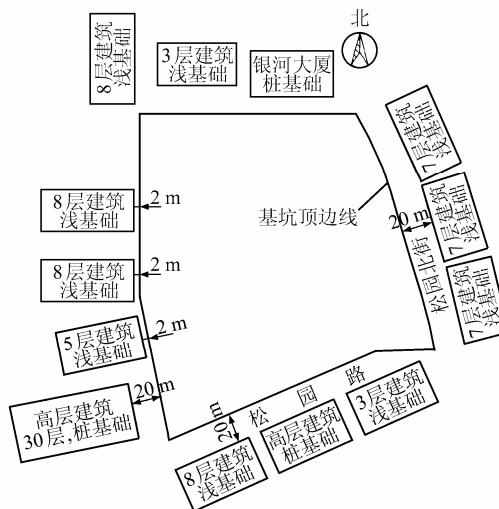


图2 基坑平面图

Fig.2 Plan of foundation pit

场地原始地貌属坡地,岩土地层从上往下分别为素填土、残积土和燕山期粗粒花岗岩。岩土物理力学参数见表1。场地地下水主要为第四系土层中的孔隙潜水。

表1 土层计算参数

Table 1 Calculation parameters of soils

地层名称	重度 / kN·m ⁻³	弹性模量 / GPa	黏结力 / kPa	摩擦角 /(°)
素填土	17.5	0.1	10	20
砾质黏性土	19.0	0.8	30	35
全风化层	19.5	1.0	35	40

3.2 基坑支护设计方案和有限元计算范围

根据场地工程地质与水文地质条件,本着技术先进、经济合理、安全适用、确保质量和保护环境的原则,笔者对鸿翔花园深大基坑进行了支护设计,并采用本文建立的复合土钉墙支护模型进行了设计计算。为保证基坑开挖稳定和周边环境安全,根据计算结果,设计采用土钉与预应力锚杆相结合的复合土钉墙支护结构型式,典型支护设计剖面见图 3。计算选取周边环境最复杂、开挖深度最深的基坑西侧进行弹塑性有限元计算。有限元网格划分见图 4。有限元计算中对地层土体变形采用理想弹塑性模型模拟,相应屈服准则采用莫尔-库仑准则。

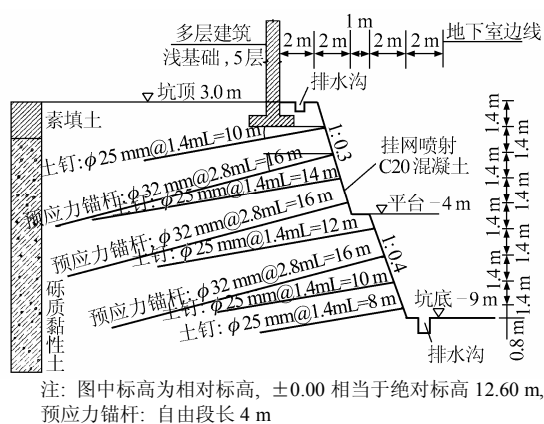


图 3 基坑支护设计剖面

Fig.3 Design profile of foundation pit supporting

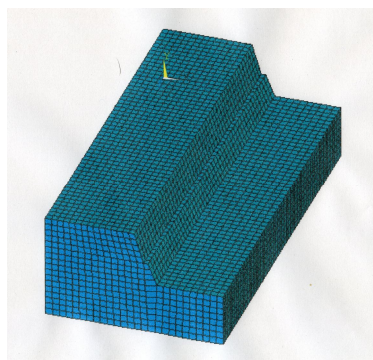


图 4 三维有限元网格图

Fig.4 3-D FEM mesh

3.3 计算结果分析

(1) 弹塑性有限元计算表面: 开挖后, 基坑产生卸荷回弹变形, 变形以水平位移为主, 方向朝向坑内。由图 5 知, 基坑支护后, 其侧向位移比不支护情况下的侧向位移平均减少近 25 %; 由图 6, 图 7 知, 基坑支护后, 其塑性区范围比不支护状况下的塑性区范围平均减少近 23 %。这说明: 土钉、锚

杆与土体联合作用, 显著提高了土体的变形刚度和抗剪强度, 从而大大降低了边坡的变形和塑性区范围。另外, 由图 8 知, 基坑坑顶监测点的计算位移与监测位移比较吻合, 其误差未超过 10 %。

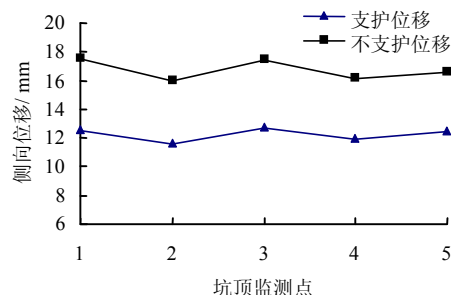


图 5 基坑支护位移与不支护位移比较

Fig.5 Comparison between supported displacements and without supported displacements for foundation pit

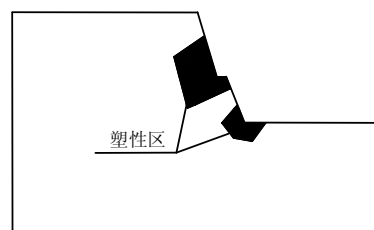


图 6 不支护时基坑塑性区

Fig.6 Plastic zones of foundation pit without supporting

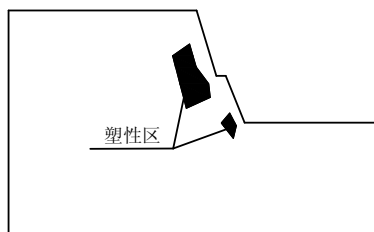


图 7 支护后基坑塑性区

Fig.7 Plastic zones of foundation pit after being supported

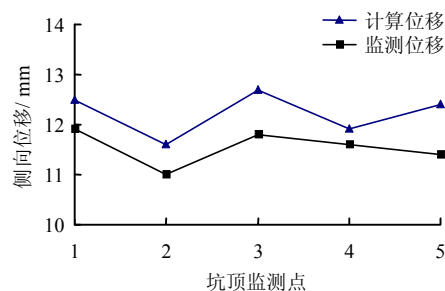


图 8 基坑计算位移与监测位移比较

Fig.8 Comparison between computed displacements and monitoring displacements

(2) 为说明计算模型对支护设计方案和工程成本的影响, 设计比较了杆单元模型和钉-锚-土联合作用模型的计算, 结果发现: 在相同的计算条件下(二者边界条件、荷载条件、计算参数相同), 为保证基坑开挖稳定, 杆单元法设计的土钉和锚杆长度比钉-锚-土联合作用法设计的土钉、锚杆长度长 32 %, 杆单元法设计的锚杆数量比钉-锚-土联合作用法设计的锚杆数量多 28 %。这说明在保证基坑开挖稳定的前提下, 钉-锚-土联合作用模型能使基坑支护设计方案得到显著优化、能显著降低工程成本并取得显著经济效益。

4 结 论

为了有效反映土钉和预应力锚杆联合形成的复合土钉墙支护结构的锚固效应, 本文建立了钉-锚-土联合作用模型。通过深圳鸿翔花园深大基坑支护工程的具体应用表明:

(1) 该模型有效反映了土钉、锚杆对土体的支护锚固效应。支护后, 土钉、锚杆显著提高了基坑边坡的变形刚度和土体的抗剪强度, 从而大大降低了基坑边坡的变形和塑性区范围。

(2) 基坑计算位移与监测位移比较吻合, 说明钉-锚-土联合作用模型模拟复合土钉墙结构的支护锚固效应是合理可靠的。

(3) 支护设计方案由钉-锚-土联合作用模型的有限元计算结果得到显著优化。基坑支护施工完毕, 其最大实测侧向位移仅 12 mm, 最大沉降仅 8 mm, 远小于国家基坑技术规范规定的基坑允许变形值要求, 保证了基坑开挖稳定和周边建筑、道路和地下管网的使用安全, 基坑支护获得了圆满成功, 并取得了显著的经济效益。

参 考 文 献

- [1] 陈肇元, 崔京浩. 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.
- [2] 程良奎, 杨志银. 喷射混凝土与土钉墙[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [3] 屠毓敏, 张雪松, 莫鼎革. 土钉墙在超软地基基坑支护中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 481—485.
TU Yu-min, ZHANG Xue-song, MO Ding-ge. Application of soil-nailed support techniques to foundation pit in super-soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 481—485.
- [4] 龚晓南. 土钉和复合土钉支护若干问题[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 80—83.
GONG Xiao-nan. Some problems on soil nailing and composite soil nailing[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2003, 36(10): 80—83.
- [5] 杨志银, 张俊, 王凯旭. 复合土钉墙技术的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 153—156.
YANG Zhi-yin, ZHANG Jun, WANG Kai-xu. Development of composite soil nailing walls[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(2): 153—156.
- [6] 张飞, 刘忠臣, 陈国刚. 预应力土层锚杆与土钉墙复合支护的力学工作机理研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 292—296.
ZHANG Fei, LIU Zhong-chen, CHEN Guo-gang. The mechanical working mechanism research on the united supporting of prestressed soil anchor and soil nailing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 292—296.
- [7] 张强勇. 岩土工程强度与稳定计算及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [8] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [9] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.