

# 深基坑复合支护技术三维数值模拟研究

杨生彬, 刘志伟

(西北电力设计院, 陕西 西安 710032)

**摘要:**北京市某深基坑工程深 19.7 m, 采用土钉墙与桩锚相结合的复合支护技术, 取得了很好的支护效果。采用有限差分法对该工程的典型支护形式开展了三维数值模拟研究, 得出了在分步开挖过程中, 土钉墙支护中土钉的工作方式和受力历程, 以及桩锚支护中护坡桩与锚杆之间的受力协调过程, 并与基坑边坡位移及支护体受力的实测数据进行了对比分析, 为深基坑复合支护技术的发展和设计提供科学的指导依据。

**关键词:**深基坑; 复合支护技术; 土钉墙; 锚杆

**中图分类号:** TU473.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2010)11-0032-03

**3D Numerical Simulation Study on Composite Supporting Technology of Deep Foundation Pit/YANG Sheng-bin, LIU Zhi-wei** (Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an Shaanxi 710032, China)

**Abstract:** The composite supporting technology combining the soil-nailing wall with pile-anchor system was used in a deep foundation pit supporting engineering with excavation depth of 19.7 m in Beijing, and the supporting effect is very good. The typical supporting form was studied by the method of three-dimensional numerical simulation with finite difference, and the result showed the work mode and force mechanism of the soil-nailing wall and force coordination process of slope protection pile and anchor bolt in pile-anchor retaining. Comparative analysis was made on the measured data of foundation pit slope displacement and retaining structure force, which can provide scientific guidance to the development and design of the deep foundation pit composite supporting technology.

**Key words:** deep foundation pit; composite supporting technology; soil-nailing wall; anchor bolt

## 0 引言

目前的城市建设中, 深基坑工程已经非常普遍, 往往都具有开挖深度大、规模大及环境复杂等特点, 以往单一的支持体系已不能确保基坑的稳定性<sup>[1]</sup>。近年来, 岩土工程师们通过不断的工程实践, 逐渐摸索和总结了一些组合式支护形式, 其中土钉墙与桩锚相结合的复合支护技术取得了很好的应用效果, 特别在北方的深基坑工程中应用居多, 如中央电视台新台址深基坑工程、北京奥运场馆深基坑工程等。此外, 也有一些学者对土钉墙与桩锚复合支护结构开展了一些针对性的研究工作, 如陆瑞明(2001)、胡瑞(2005)等人通过工程实践与研究, 均指出桩锚与土钉墙联合支护结构形式可以大大发挥这两种支护结构的长处, 达到方案合理、施工简便、经济可靠的目的<sup>[2,3]</sup>; 陈肇元(2000)、王远祥(2005)等指出在桩锚与土钉墙联合支护结构设计计算方面, 由于两种支护受力模型不同, 如何建立其计算模型有待进一步完善, 尤其是两种结构受力变形的协调、破坏模式及安全系数取值等有待进一步研究<sup>[4,5]</sup>等。

本文结合北京市某深基坑工程实例, 采用有限

差分法对土钉墙与桩锚相结合的复合支护体系进行了三维数值模拟研究, 以进一步探究各支护单元的受力特征和基坑的变形特征, 更好地指导工程设计及施工。

## 1 工程概述

拟建北京市某高新技术大厦地上 27 层, 框剪结构, 地下为 4 层, 拟采用筏板基础, 基坑挖深为 19.7 m。根据岩土工程勘察报告, 拟建场地 55 m 深度范围内岩性以卵石层夹砂土、粘性土为主, 地下水埋深 27.4 ~ 27.8 m。基坑开挖深度范围内的土层参数及其物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层物理力学性质指标

土层名称	层厚 /m	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	粘聚力 $c$ /kPa
粉质粘土	6.7	16.0	20.0	30.0
细砂	13.0	18.0	30.0	0
卵石	>10.0	21.0	36.0	0

经综合分析, 本工程选择土钉墙与桩锚相结合的复合支护型式, 支护参数见图 1。

收稿日期: 2010-04-29

作者简介: 杨生彬(1979-), 男(汉族), 内蒙古化德人, 西北电力设计院, 岩土工程专业, 博士, 从事特殊土处理及地下工程设计等岩土工程研究工作, 陕西省西安市新城区金花北路 280 号, yangshbin@qq.com。

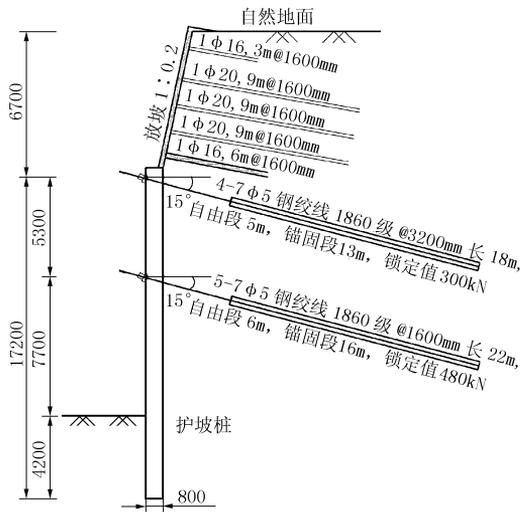


图 1 基坑支护设计参数

屈服强度 150 kN,法向刚度为  $1 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 、切向刚度为  $1 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ,面层弹性模量为 25.5 GPa,泊松比 0.2;两道预应力锚索为 7 $\Phi$ 5 (1860 级) 高强度低松弛钢绞线,公称直径  $d = 15 \text{ mm}$ ,抗拉强度设计值 1320 MPa,弹性模量 45 GPa。

### 2.3 模拟结果及分析

假定土钉和预应力锚索、面层及桩都是均质的、各向同性的线弹性材料,分别采用结构单元 cable、liner、pile 单元模拟其力学性质<sup>[7]</sup>。土体采用摩尔-库伦强度准则,计算中不考虑地下水,地面无超载。

在坡顶、土钉和锚索端头设置了水平位移监测点,以监测基坑的水平变形,基坑底设置竖向位移监测点来监测坑底隆起变形。

#### 2.3.1 土钉墙支护分析

土体采取分步开挖,分步支护,随挖随支。第一步开挖后设置了面层及第一道土钉,运行基本稳定后,土钉轴向拉力最大值为 3.592 kN,水平位移为 2.84 mm,可见位移量很小,主要是因为开挖深度小,支护实施及时,若加大开挖深度的话,坡顶位移会随之增大,这也就是土钉墙施工中特别规定开挖分步进行并不得超挖的原因所在。

第二步~第五步开挖过程相同,通过土钉轴向拉力及端头水平位移监测发现,土钉受力随着不断向下开挖,每步开挖中相邻土钉轴向拉力增量偏大,而由下向上的土钉轴向受力增量逐次减小,受力集中处位于基坑的中部,第三、四道土钉受力最大,其轴向拉力分别为 46.20、63.80 kN。可见,整个支护系统的受力重心在不断开挖中逐渐下移,而第一道土钉的设置主要控制边坡的初始位移。土钉墙的水平位移分布见图 3,最大位移量为 26.8 mm。

## 2 三维数值模拟及分析

### 2.1 模型的建立

根据地层情况及支护设计参数建立数值模型,如图 2 所示,模型尺寸为 40 m  $\times$  20 m  $\times$  28 m ( $x \times y \times z$ )。

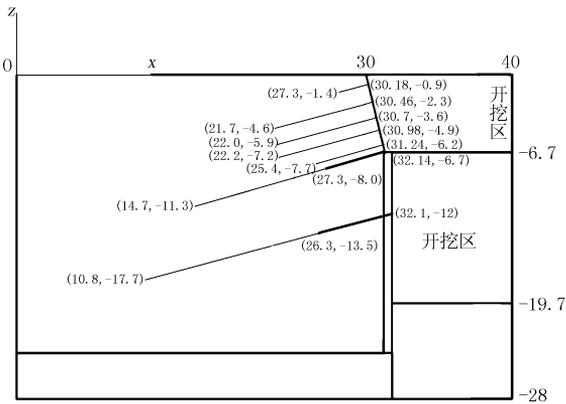


图 2 数值模型

模型的坐标系采用直角坐标系,xy 平面取水平面,z 轴为铅直方向,整个坐标系符合右手螺旋法则<sup>[6]</sup>。

### 2.2 模型参数的设置

根据数值计算的需要,对土层及支护体设置所需参数,其中土层和护坡桩计算参数见表 2。

表 2 数值计算参数

名称	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
粉质粘土	10.0	2.14	1600
细砂	12.5	5.77	1800
卵石	32.6	17.7	2100
护坡桩	10101	8547	2200

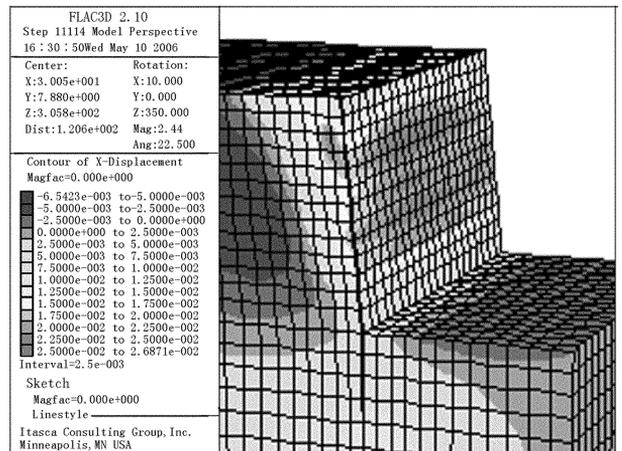


图 3 土钉墙水平位移等值线图

土钉为 II 级螺纹钢,弹性模量 20 GPa,抗拉

同时土钉的受力分布呈现中部大、两端小的典型应力分布状态,说明其受力是均匀的,见图4。

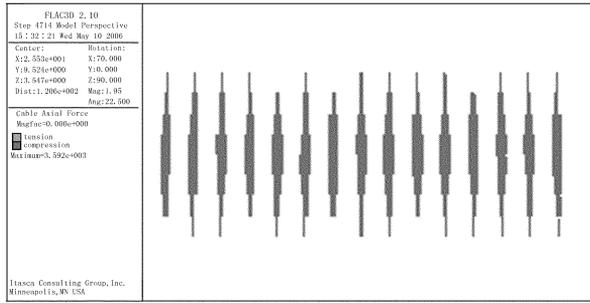


图4 土钉受力分布状态

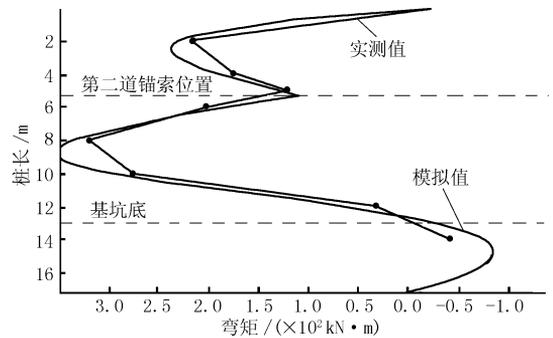


图5 桩身弯矩分布图

### 2.3.2 桩锚支护分析

土钉墙施工完成后,桩锚支护的工序为先打设护坡桩,然后土体开挖至第一道锚索位置,设置第一道锚索,施加预应力后再开挖至第二道锚索位置,设置第二道锚索,施加预应力,然后开挖至基底。在数值模拟中,通过位移监测来实现以上过程,在进行下一步开挖时已有支护体及基坑的变形已基本趋于稳定。

根据位移监测数据,开挖及支护完成后,坡顶水平位移最大值为14.6 mm,桩顶水平位移最大值为9.1 mm,地面及基底竖向位移均在10 mm以内,基坑整体变形量微小。

从图5所示的桩身弯矩分布图可以看出,桩身最大弯矩基本位于桩身中部,最大弯矩为362.2 kN·m;在设置第二道锚索的部位出现了弯矩凹点,桩身反弯点出现在桩身的3/4处(约12.9 m位置),在此处桩身的弯矩由正弯矩转变为负弯矩,最大负弯矩为-63.1 kN·m。将模拟结果与实测值对比发现,桩身弯矩沿深度的分布和变化趋势上,模拟值与实测值基本吻合。

锚索受力显示,随着开挖深度的增加,锚索轴向拉力在逐渐增加,但增加到一定程度后基本趋于稳定,说明在开挖卸荷时,支护抗力主要由锚索提供,通过锚索与土体之间的粘结力将力传递到土体深处,锚索轴向拉力逐渐增加到最大值,第一道锚索最大拉力为560 kN,第二道锚索最大拉力为903 kN,这也正体现了施加预应力的作用所在。此后,随着桩体的侧向抗弯性能的发挥,与锚索作为一个支护

体系逐渐达到了受力的平衡。

在下部土体开挖和桩锚支护过程中,对上部土钉墙的受力和位移也有一定的影响,特别是在第二道锚索以上的土体开挖时,土钉墙位移增量较大,由26.8 mm增加到35.4 mm,但总体上位移量还是偏小的。土钉的受力也有一定的增加,但增量不大。

### 3 结论

运用三维数值方法模拟了深基坑支护中两种支护体系相结合的复合支护技术,从受力和位移的角度分析了各支护单元的受力性状和相互之间的关系,对于深基坑支护设计及其优化具有一定的指导意义。同时,采用土钉墙与桩锚相结合的复合支护技术,很好地利用了两种支护技术的优点,可以有效缩短工期,同时能够大大节约工程造价,应进一步推广应用。

### 参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] 陆瑞明,赵锡宏,马忠政,等. 组合式挡墙的基坑围护非线性的空间设计计算理论和方法[J]. 土木工程学报,2001,34(6):80-87.
- [3] 胡瑞,颜海春,蔡灿柳. 复合土钉与桩锚联合支护的应用研究[J]. 建筑施工,2005,27(6):29-32.
- [4] 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,2000.
- [5] 王远祥,汪永新. 复合式围护结构在深基坑开挖中的应用及有限元分析[J]. 铁道建筑,2005,(6):56-59.
- [6] 张飞,刘忠臣,陈国刚. 预应力土层锚杆与土钉墙联合支护的力学工作机理研究[J]. 岩土力学,2002,23(3):292-296.
- [7] 黄伟洪,路世豹,陈成意,等. 锚杆锚索联合支护数值模拟及现场应用[J]. 青岛理工大学学报,2009,30(2):23-26.

欢迎订阅 2011 年《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志,欢迎刊登广告!