

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.05.003

# 某深基坑桩锚支护结构稳定性分析

鲁楠, 杨晓华, 曾莹莹

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 以实际基坑支护工程为背景, 利用 ANSYS 有限元分析软件, 建立一个符合实际工程的理想平面应变模型, 通过杀死土体或激活支护单元来实现基坑开挖支护的连续施工过程。改变计算模型中的支护方式, 分析了影响桩锚支护结构稳定性的因素。将各工况下基坑结构的变形计算结果与实际监测数据进行了对比, 证明有限元计算模型的合理性, 可为实际工程提供指导。

**关键词:** 深基坑; 桩锚支护; 有限元

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)05-0012-05

## A Structural Stability Analysis of the Pile-anchor Protection in Deep Foundation Pits

LU Nan, YANG Xiaohua, ZENG Yingying

(Schools of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** An ideal plane strain model has been set up, by using ANSYS finite element analysis software, to achieve a continuous construction of the foundation pit excavation support by killing the soil or activating the support units. An analysis has been made of the relevant factors, which affect the stability of the pile anchor supporting structure, by changing the support pattern in computational models. A comparison has been made between the calculation results of the deformation of foundation pits and the actual monitoring data under various operating conditions, thus verifying the feasibility of the finite element calculation model with a further guidance for engineering practice.

**Keywords:** deep foundation pit; pile anchor supporting; finite element

## 0 引言

随着城市的现代化发展, 土地资源越来越紧张, 为了充分利用有限的城市空间, 出现了大量地下工程。在紧密的建筑群中进行地下工程施工时, 不可能有足够空间进行放坡开挖。为保证施工安全和施工方便, 对深基坑开挖时必须采用有效的支护措施。在实际工程中, 常采用由人工挖孔桩结合预应力锚杆及防水帷幕等组成的桩(墙)式支护体系进行边坡支护<sup>[1]</sup>。

桩锚支护结构是由前期设置在基坑外围的支护

桩和土层开挖后设置的预应力锚杆共同组成, 借助支护桩在开挖面以下的插入深度和设置在开挖面以上的锚杆系统来平衡墙后的水、土压力以维持边坡的稳定<sup>[2]</sup>。土层的逐层开挖和锚杆的设置过程中, 支护结构和土体发生复杂的力学过程, 不断地调整支护结构的变形和受力。本文以实际工程为背景, 对工程进行合理简化, 建立平面弹塑性模型, 借助 ANSYS 软件对模型进行非线性计算, 并与实际监测数据对比。根据各工况下结构的变形和受力情况, 分析桩锚支护结构的稳定性。

收稿日期: 2016-08-13

作者简介: 鲁楠(1992-), 男, 安徽宣城人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为混凝土结构设计原理,

E-mail: lunan19920622@163.com

## 1 工程概况

本工程项目为某医院门诊大楼,结构主体为地上16层,地下一层。建筑所处场地为山坡,在进行基坑开挖时,开挖深度随现场地形而改变,最大深度在建筑的西南角。门诊大楼的南侧为老住院部,东侧临院内公路,西侧为生活区,北侧距基坑较远处为城市主干交通道路。

考虑基坑开挖对支护结构的平面效应,利用平面模型以获得更好的效果,本文选择基坑南侧端部进行有限元分析。支护桩采用 $\Phi 1\ 000$ 灌注桩,桩间距为2 000 mm,桩长为14 m,桩顶设500 mm $\times$ 1 000 mm冠梁,分别在距地面3.5、6.0和8.5 m处设3道锚杆,锚杆长度21 m,水平倾角 $10^\circ$ ,基坑支护结构见图1。

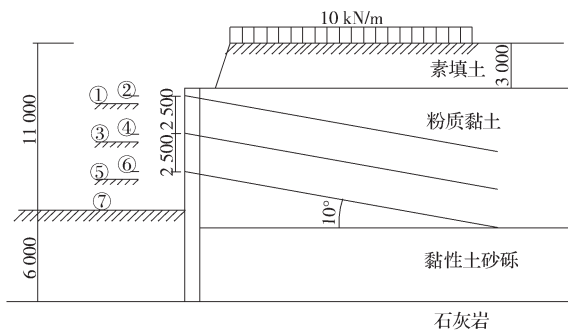


图1 基坑支护结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foundation pit supporting

## 2 计算模型

### 2.1 本构关系

本文建立平面应变模型,忽略边坡侧向的变形。土体的材料性能非常复杂,建立模型时需对土体进行合理简化<sup>[3]</sup>。根据现场地质勘察报告结果,将计算范围内的土体分为4层,各土层按各向同性、均质的理想弹塑性材料考虑。模型采用Drucker-Prager(DP准则)屈服准则,该准则是在Mises准则基础上考虑静水压力,其表达式为

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0, \quad (1)$$

式中: $I_1$ 为应力张量的第一不变量;

$J_2$ 为应力偏张量的第二不变量;

$\alpha$ 和 $k$ 为材料常数,满足

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad (2)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}. \quad (3)$$

其中, $\phi$ 为内摩擦角, $c$ 为黏聚力。

在实际工程中,支护桩和锚杆的设计值都是偏安全的,所以实际达到的应力值远小于其屈服应力值,通常认为基坑开挖过程中支护桩和锚杆一直处于弹性状态。建立模型时,支护桩和锚杆按均质、各向同性线弹性材料处理,并对支护结构和土体间接触关系采用共节点进行处理,假定支护结构与土体无相对滑移。

### 2.2 有限元单元类型的确定

本模型中用到了3个基本单元。土体采用支持DP准则的8节点平面单元PLANE82,它是4节点PLANE42的高阶单元,其处理不规则形状的网格精度更高;桩采用BEAM3单元,该单元可以有效地模拟土压力作用下桩身的轴向拉压和弯矩情况;锚索的模拟采用LINK1单元,其只考虑单轴的拉压作用。考虑到基坑的开挖及支护情况比较复杂,模拟分析时收敛比较困难,因此不考虑桩土界面的接触单元,采用共节点处理。

### 2.3 数值计算参数

根据场地地质勘察报告,本模型中基坑土体自上而下分别为素填土层、粉质黏土层、黏性土砂砾层和石灰岩层4层。工程地质情况及主要物理力学性能指标数值见表1,其中弹性模量 $E$ 按经验公式取土体压缩模量 $E_s$ 的2~5倍<sup>[4]</sup>。

表1 各土层主要物理力学性能指标

Table 1 Main physical and mechanical property indexes for various soil layers

土层名称	厚度/m	$\gamma /$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$C /$ kPa	$\phi /$ ( $^\circ$ )	$E /$ MPa	$\mu$
素填土	4.5	18.1	10	6.5	8	0.30
粉质黏土	10.5	19.3	16	10.0	35	0.37
黏性土砂砾	12.0	20.0	25	17.0	80	0.35
石灰岩	18.0	20.0	140	30.0	280	0.25

第一层为素填土,实际工程中采用土钉墙支护方式控制土体滑移,建立有限元模型时将土体黏聚力放大10倍以达到减少土体滑移的效果。支护桩混凝土强度为C30,有限元模型中取桩体弹性模量为 $3.00 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,泊松比为0.2。锚索采用2S15.2钢绞线,由于锚杆的预应力是依据锚索的弹性变形特性施加的,所以模型中杆截面积按锚索截面积考虑。锚索弹性模量为 $1.95 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,泊松比为0.3,线膨胀系数 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,采用等效降温法对锚杆施加100 kN的预应力。本文建立的是平面模型,即选取垂直计算平面方向单位厚度的边坡进行分析,所以有限元模型中锚杆的刚度按实际刚度除以其纵向间距考虑。实际锚杆轴力应为计算得出的轴力乘以

锚杆间距<sup>[5]</sup>。

## 2.4 初始应力场问题

土体本身存在自重,在未开挖时坡体就存在着初始应力场,影响着后期土体开挖时应力场的分布,所以不能忽略。在用 ANSYS 进行有限元分析时,首先要确定土体的初始应力状态,再进行土体的加荷或者卸荷。目前还没有准确的方式确定土体的初始应力场,实际工程中常利用土体的重力场近似代替土体在初始应力状态,即在有限元计算时考虑重力加速度  $g$ <sup>[6]</sup>。后期考虑位移时要扣除初始应力场作用下初始位移。

## 2.5 非线性有限元计算方法的确定

本模型求解的是非线性问题,需要考虑土体材料非线性、支护结构几何非线性、桩土间状态变化非线性。在基坑支护过程中,由于支护结构的变形都被设计控制在弹性变形阶段,通常忽略几何非线性<sup>[5]</sup>。状态变化非线性主要是由于土体脱离支护结构而引起两者之间作用力消失,或者由于两者相对滑移可能造成土体的屈服。课题组在求解非线性方程时采用 Newton-Raphson 方法,用一系列带校正的线性近似求解非线性问题,在一定容限范围内,它迫使在每一个载荷增量的末端达到平衡收敛,并且每进行一次平衡迭代都要修改刚度矩阵,其计算量较大,但该方法精度较高<sup>[7]</sup>。

# 3 工程实例分析

## 3.1 建立模型

有限元计算模型按照图 1 所示的 7 个工况依次进行基坑支护开挖模拟,通过杀死土体或激活支护单元来实现基坑的开挖和支护的连续计算。已有研究表明,基坑开挖对基坑开挖深度 1~2 倍范围内的土体影响显著<sup>[6]</sup>,因此有限元模型的范围为左边界选取基坑宽度方向的一半,距离基坑壁 15 m,右边界至基坑壁后 30 m,下边界取基坑底以下 20 m。忽略模型外土体水平方向的变形和模型以下土体的沉降,对左右边界施加水平约束并限制模型底部所有自由度,素填土表面考虑  $10 \text{ kN/m}^2$  的施工荷载。模型网格尺寸设为 0.5 m,采用自由划分的方式划分网格。工况七的模型及网格划分如图 2 所示。

## 3.2 基坑开挖稳定性分析

对基坑不采取任何措施进行开挖,将 4 层土开挖完成后,在基坑底部位置变形量达到 226.3 mm,如图 3 所示。此时土体坍塌,基坑已经破坏了,不能进行施工,需要进行基坑支护。本工程采用支护桩,并设置了 3 道锚杆约束桩的侧向变形。

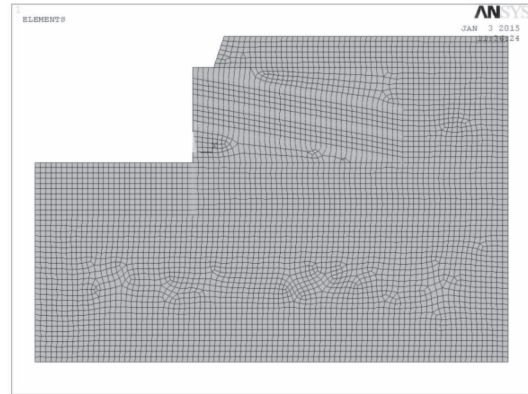


图 2 基坑开挖完成阶段模型图

Fig. 2 Model diagram of the last stage of excavation

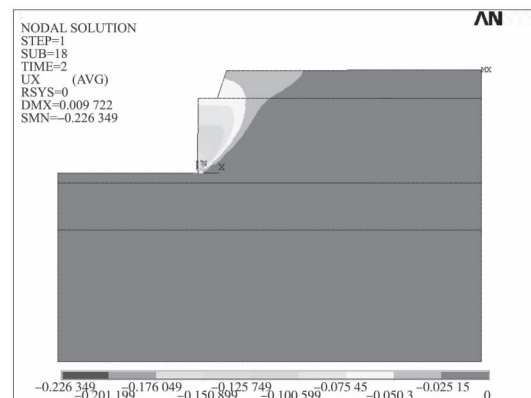


图 3 未支护基坑 X 方向变形云图

Fig. 3 Deformation nephogram of non-supporting foundation pit in X direction

## 3.3 支护桩身水平位移分析

基坑开挖的过程是一个卸载的过程。基坑开挖前,支护桩两侧作用荷载平衡;基坑内土体的开挖清理使得坑内土体对基坑壁和支护桩的侧向压力逐渐减小,导致支护桩同时承受的主动土压力逐渐增大,支护桩顶位移逐渐增大。为了突显锚杆的作用,在只考虑支护桩未激活锚杆单元时,对基坑进行开挖,得出了支护桩桩身水平位移,如图 4 所示。由图 4 可以很明显地发现,桩身各处位移随着开挖深度逐渐增大,并且同一开挖深度时支护桩桩身位移由桩顶到桩底递减。

按照实际施工过程,对支护桩和锚杆单元进行激活,模拟出土体开挖和锚杆的设置对桩桩身水平位移的影响,计算得出位移如图 5 所示。观察图 5,在第一层土开挖完成后,未设置锚杆时,支护桩就相当于一根悬臂构件,桩后土体的作用使桩的变形呈现顶部水平位移最大向下逐渐变小的曲线,即工况一对应的曲线。对比图中工况二与工况一曲线发现,设置第一道锚杆后,桩顶水平位移明显减少,且桩身最大位移不在桩顶,而在开挖面与桩顶之间。这

是由于锚杆的设置相当于在桩身施加一个集中力,有效的限制了桩身的变形。进行第二层土体开挖,桩顶位移增大,施加第二道锚杆后,桩顶位移比二层土体开挖结束时减小且最大位移对应位置比工况二下移,这是2道锚杆共同作用的效果。后面的工况也都呈现挖土时桩身变形比前一工况增大,加锚杆时又比前一工况减小的规律,但最大位移都不在桩顶并且位置向下移动,桩身变形呈抛物线形<sup>[8-9]</sup>。桩底位移在1 mm左右,体现出了桩的嵌固效果,符合桩设计要求和实际工程中桩的变形情况。

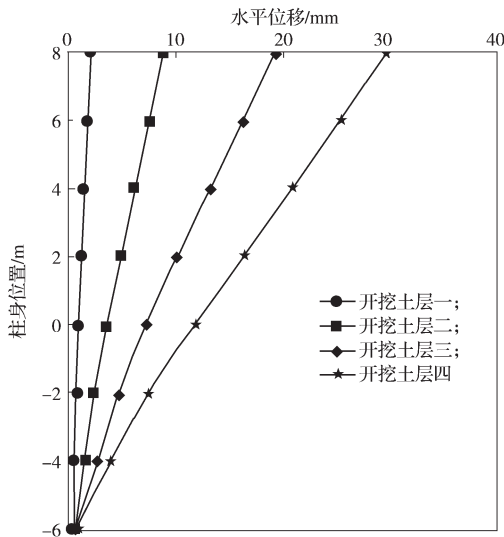


图4 不设锚索时支护桩身水平位移

Fig. 4 Horizontal displacement of supporting piles without anchors

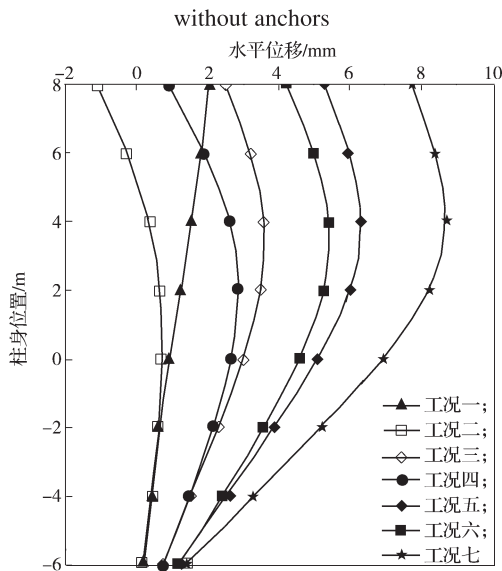


图5 各工况支护桩身水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of supporting piles in different construction processes

### 3.4 支护桩顶水平位移分析

各工况下基坑南侧桩顶水平位移监测值与有限元计算结果如图6所示。从图6中可以很容易地发现,

两者数据趋势一致,水平位移都在开挖时增大,设置锚杆时减小,但计算值略大于检测值,这与一些文献的结论是一致的<sup>[5]</sup>。这是由于实际工程是空间体系,支护桩之间通过连接构件相联系,具有更好的整体性,对土体的约束作用比单位宽度的支护结构强,所以就出现了计算值大于检测值的现象。从图中可以看出工况二时检测值和计算值都出现负值,锚杆的设置使支护桩向土体方向移动,并且计算值小于检测值,说明数值模拟中,锚杆对单位宽度支护结构的约束比实际工程锚杆对桩位移约束更接近理想状态。

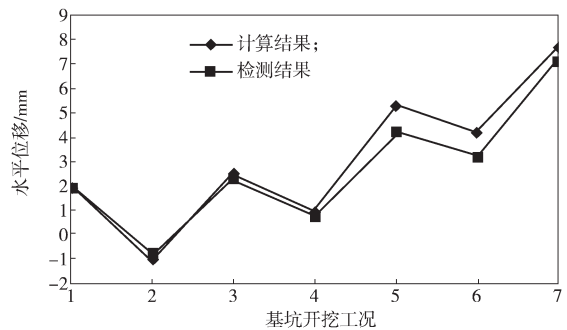


图6 各工况支护桩顶水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of supporting pile tops in different construction processes

### 3.5 锚杆内力分析

锚杆的设置,有效地限制了支护桩的变形,确保了基坑壁的稳定。设置锚杆时,对锚杆施加了预拉力使杆体发生弹性变形。在锚具安装完成后,杆体收缩对支护桩后土体起到压缩的效果,可以抵消因为基坑内土体开挖导致桩后土体的变形。模拟实际施工过程,得出第一道锚杆在各工况下轴力的变化曲线,如图7所示。从图7中可以看出,锚杆轴力在锚固段较小,靠近锚头处较大。随着开挖深度的增加,锚杆的轴力增加。计算结果显示,每增加一道锚杆都会分担前几道锚杆的受力,很明显这是锚杆共同作用的结果。

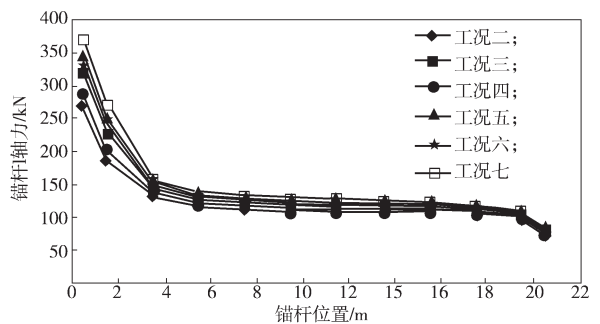


图7 各工况第一道锚杆轴力

Fig. 7 Axial force of the first bolt in different construction processes

## 4 结论与建议

1) 本文运用 ANSYS 建立平面应变模型, 通过对边坡采取不同的措施, 分析基坑的变形情况, 论证了采用桩锚支护的必要性和有效性;

2) 通过控制生死单元模拟基坑开挖, 得出了各工况下桩身变形和锚杆轴力变化情况, 与已有研究结论相符。对比桩顶水平位移计算值和实际监测数据, 验证了模型的合理性, 对实际工程分析边坡的稳定性具有指导作用;

3) 利用 ANSYS 进行土体的数值模拟时, 对土层参数的设置是根据现场勘察数据并结合一些经验公式确定的, 势必会影响模拟的精度。建议针对各参数对结果的影响进行更多的数值模拟与试验, 进一步优化数值模型来提高模拟结果的精确性。

### 参考文献:

- [1] 胡激扬. 宏图香榭里基坑支护设计与监测研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.  
HU Jiyang. Research on Design and Monitoring in Foundation Pits Retained of Hongtu-Xiangxieli Project[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [2] 杨晓华, 陈 藤, 刘龙海, 等. 某深基坑桩锚支护结构监测结果分析[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(5): 1-6.  
YANG Xiaohua, CHEN Teng, LIU Longhai, et al. Analysis of Monitoring Results of a Deep Foundation Pit with Pile-Anchor Retaining Structure[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 1-6.
- [3] 王 宁, 刘 杰, 王 威, 等. 土工格室+阶梯型变截面及等截面桩复合地基承载性状对比研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(5): 15-18.  
WANG Ning, LIU Jie, WANG Wei, et al. A Comparative Study on Bearing Behaviors of Composite Foundations with Geocell + Step Variable Section Pile and Geocell + Constant Section Pile[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(5): 15-18.
- [4] 陈勇华. 土体压缩模量、变形模量和弹性模量的讨论[J]. 城市建设, 2010(16): 135-136  
CHEN Yonghua. The Discussion of Soil Compression Modulus, Deformation Modulus and Elastic Modulus[J]. Chengshi Jianshe Yu Shangye Wangdian, 2010(16): 135-136.
- [5] 陆 东. 深基坑桩锚支护有限元分析[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2010, 18(6): 1-7.  
LU Dong, The Finite Element Analysis of Pile-Anchor Protection in Deep Foundation Pit[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2010, 18(6): 1-7.
- [6] 李 永. 深基坑桩锚支护结构设计应用研究及数值模拟分析[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
LI Yong. Design-Application and Numerical Analysis of Pile-Anchor Reinforcement Structure in Deep Foundation [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [7] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 430-433.  
WANG Xinmin. Numerical Analysis of Engineering Structure by ANSYS[M]. Beijing: China Communication Press, 2013: 430-433.
- [8] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 108-159.  
LIU Guobin, WANG Weidong. Excavation Engineering Handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 108-159.
- [9] 汤磊华, 何 杰, 王亚涛, 等. 柔性楔形桩复合地基承载特性试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(4): 20-25.  
TANG Leihua, HE Jie, WANG Yatao, et al. Experimental Study on Bearing Behavior of Composite Foundation with Flexible Tapered Column[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(4): 20-25.

(责任编辑: 申 剑)