

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.035

# 高压旋喷锚索与灌注桩支护结构三维数值分析

彭超, 余建民

(华北水利水电大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450045)

**摘要:** 为了研究高压旋喷锚索与灌注桩支护结构在深基坑工程中的工作性状,利用三维快速拉格朗日方法(FLAC<sup>3D</sup>)对郑州市某主要采用桩锚支护形式的深基坑工程的开挖支护进行了三维动态模拟分析,得到了基坑开挖过程中高压旋喷锚索的受力,灌注桩围护体的变形,基坑外土体的水平位移和基坑外土体的沉降变形规律。除了在坑外沉降变形方面,摩尔-库仑模型的计算结果始终为较大的回弹变形,其他与已有文献的经验性规律基本吻合,且结构安全性和稳定性满足规范要求。分析结果可为以后该地区类似的高压旋喷锚索与灌注桩支护结构的设计施工应用提供参考。

**关键词:** 深基坑; 三维快速拉格朗日方法; 高压旋喷锚索; 桩锚支护

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)01-0194-04

## Three Dimensional Numerical Analysis of the Supporting Structure of High Pressure Jet-Grouting Cable and Bored Pile Wall Based on FLAC<sup>3D</sup>

PENG Chao, YU Jianmin

(School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China)

**Abstract:** In order to analyze the behavior of the supporting structure of high pressure jet grouting anchor and bored pile wall in deep foundation pit, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC<sup>3D</sup>) was employed to investigate the deformation characteristics of a staged excavated and supported foundation pit of which the piles and anchors were adopted as the primary supporting structure in Zhengzhou City. The change of high pressure jet grouting cable, the deflection of bored pile walls, the settlement of ground surface, and the movement of the deep strata outside the excavation were analyzed which are basically consistent with the empirical ones from the existing literatures except the settlement of ground surface. And structural safety and stability meet the standard requirements. The numerical results provide a useful reference for the design and construction of similar deep excavation projects in the future.

**Keywords:** deep foundation pit; FLAC<sup>3D</sup>; high pressure jet grouting cable; pile-anchor supporting

桩锚支护结构体系是一种超静定结构,稳定性好,安全性高,它把排桩施工技术 with 预应力锚杆(索)施工技术结合起来,运用锚杆(索)和土体间的摩阻力以及排桩嵌固段约束力共同抵抗桩后土压力,维护结构的稳定,是现阶段较为成熟、应用广泛的深基坑支护手段,属于主动支护结构<sup>[1-6]</sup>。桩锚支护的工作机理非常复杂,在基坑开挖过程中,支护结构和土体相互作用,支护结构不断调整自身的受力与变形。对于此方面的研究,许多学者已经进行了分

析<sup>[7-9]</sup>。而本文所要研究的高压旋喷锚索—灌注桩是桩锚支护体系中经常使用的一种先进的施工技术,但是工程中对这体系变形及受力性能的认识主要是依靠经验进行的,出现了理论落后于实践的现象。所以我们有必要对此桩锚支护结构体系的工作机理进行深入地研究。本文采用 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件对桩锚支护结构在开挖过程中高压旋喷锚索的受力,灌注桩围护体的变形和基坑周围土体的变形规律进行模拟和分析。

# 1 工程概况

拟建工程为郑州嘉辰丽景苑项目一期工程,位于郑州市金水区经三路与广电南路交叉口东北角。地下水埋深在自然地面下约 4.0 m~4.8 m,2013 年 10 月中旬,现场实测为 7.0 m 以下。基底埋深为自然地坪下 9.80 m~11.80 m,基坑内水位应在基底 下 0.5 m,即自然地坪下 12.30 m 位置。因此,考虑施工降水。基坑最东侧地下室外墙距 6F 已建建筑物最近约 8.6 m;建筑物为半层地下室,筏板基础,埋深 3.0 m;基坑深度为 10.00 m;基坑侧壁安全等级为一级,可采用采用高压旋喷锚索与灌注桩支护结构;其他剖面采用无砂混凝土小桩+预应力锚杆+土钉墙复合支护结构或者人工放坡素喷支护。

各土层力学参数的取值如表 1 所示。

表 1 土层设计取值参数表

土层	厚度/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$c/kPa$	$\varphi/(^{\circ})$
杂填土	1.5	18.5	5.0	10.0
粉土	2.7	19.5	14.3	20.3
粉质黏土	1.0	19.2	11.5	17.6
粉土	3.8	19.6	13.2	21.0
粉质黏土	2.3	18.9	18.9	6.9
粉土	1.2	19.6	12.8	26.0
粉质黏土	4.8	19.0	16.6	5.7
细砂	10.0	20.0	1.0	28.0

# 2 计算模型和参数确定

## 2.1 计算模型和边界条件

计算模型为东侧的桩锚支护部分,其他部分不作分析。模型的三维尺寸为 82.20 m×36.00 m×77.24 m,网格节点数为 79 508,网格单元数为 72 879,如图 2 所示。模型外边界采用侧向约束,底面采用全约束。基坑最大开挖深度为 10 m,分五步开挖,开挖步骤如表 2 所示。计算中不考虑土体的分层和基坑降水的影响,土体本构模型采用摩尔-库仑模型,不考虑地下水的影响,土体参数按正常固结考虑。

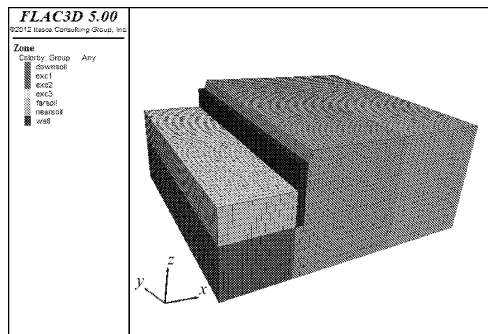


图 1 计算模型

表 2 开挖步骤

开挖步骤	工况描述
1	开挖 2.0 m 深,进行土钉墙施工,编网喷射混凝土护坡。
2	开挖 1.0 m 深,进行土钉墙和灌注桩施工,编网喷射混凝土护坡。
3	开挖 2.0 m 深,进行高压旋喷锚索施工,铺钢丝网喷射混凝土护坡。
4	开挖 2.5 m 深,进行高压旋喷锚索施工,铺钢丝网喷射混凝土护坡。
5	开挖 2.5 m 深,铺钢丝网喷射混凝土护坡。

## 2.2 支护结构参数

钻孔灌注桩围护体按照等刚度原则折减为厚度为 0.5 m 的壁式地下连续墙,嵌固深度 10 m,桩顶标高-3 m,钢筋等级为 HRB400,其参数如表 3 所示,用嵌入式 Liner 单元来模拟。高压旋喷锚索和土钉用 Cable 单元模拟,第一道锚索由四束直径为 15.2 mm 的钢绞线组成,第二道锚索由三束直径为 15.2 mm 的钢绞线组成,两道锚索自由段直径均为 0.25 m,锚固段直径均为 0.4 m,水平间距均为 1.5 m,预应力均为 200 kN,其参数如表 4 所示。第一级放坡用土钉墙支护,土钉水平间距均为 1.5 m,钢筋均为 HRB400,其参数如表 5 所示。土钉墙面层厚度为 80 mm,材料为 C20 细石混凝土,钢筋网水平方向和竖直方向的间距均为 300 mm,直径为 6.5 mm,斜拉钢筋的直径为 10.0 mm,钢筋等级为 HPB300,土钉墙和平台都用厚度为 0.08 m 的单面 Liner 模拟。不同单元间采用共用节点实现内力的传递,如图 2 所示。

表 3 灌注桩参数

桩间距/m	桩长/m	直径/m	强度等级
1.5	17	0.8	C30

表 4 锚索参数

竖直间距 /m	入射角度 /( $^{\circ}$ )	锚索长度 /m	锚固段长度 /m
2.8	15	22	14
2.8	15	19	13

表 5 土钉参数

竖直间距 /m	入射角度 /( $^{\circ}$ )	钻孔直径 /m	土钉长度 /m
1.2	10	0.1	5
1.2	10	0.1	4

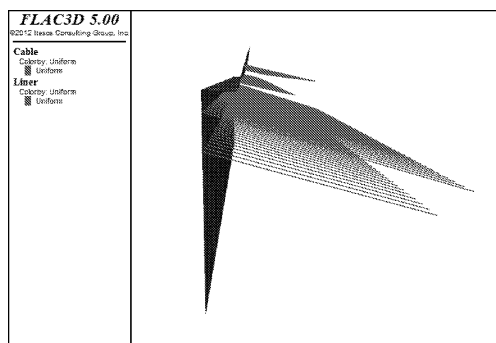


图 2 结构单元模型

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 坑外土体水平位移

研究表明灌注桩围护体后土体水平位移大致可以分为两个区域,分别为块体滑动区和线性递减区;块体滑动区内土体水平位移基本保持不变;线性递减区内土体水平位移逐渐减少至零<sup>[10-12]</sup>。本支护方案上部 3 m 为土钉墙放坡支护,下部 7 m 采用桩锚支护,在此只需从第 3 步开始研究。图 3 为不同步骤下坑外土体的水平位移。

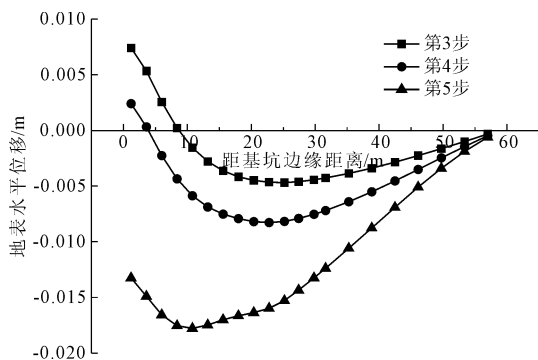


图 3 不同步骤的地表水平位移

由图 3 可知,随着基坑不断向下开挖,地面土体的水平位移不断增大。块体滑动区大约在距离基坑边缘 20 m 至 25 m 之间,线性递减区大约在距离基坑边缘 25 m 以外,而且在第 3 步和第 4 步中,靠近基坑边缘的土体稍微向基坑外侧移动了几毫米,这主要可能是第 1 步和第 2 步放坡开挖进行土钉墙施工的结果。由此可以看出,在桩锚支护结构中,放坡土钉墙支护对结构安全和稳定的重要性。所以在施工场地允许的条件下应尽量先放坡,然后再进行桩锚支护,既节省材料又能够充分地保证结构的安全。

#### 3.2 高压旋喷锚索内力

高压旋喷地锚工艺主要特点是其将钻孔、注浆、搅拌和插筋工序一次完成,能够提高原位土体强度,

增大与周围土体的摩阻力,有效地防止土体发生过大位移。而且高压旋喷锚杆筋体可以回收,能够降低锚杆施工对周围环境的影响<sup>[13]</sup>。图 4~图 6 为不同步骤下高压旋喷锚索内力的变化情况。

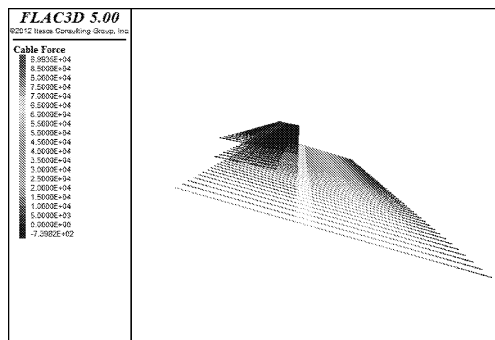


图 4 第 3 步支护锚索内力云图

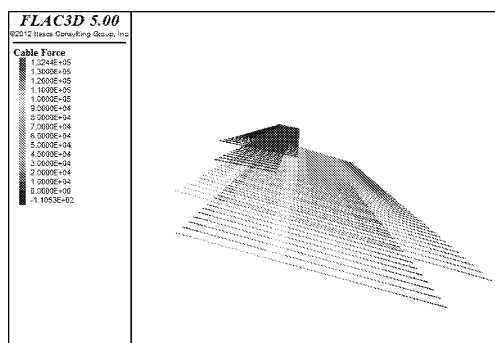


图 5 第 4 步支护锚索内力云图

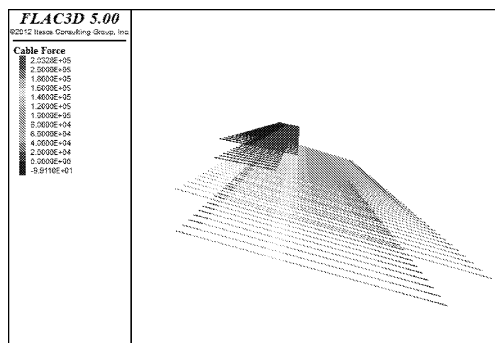


图 6 第 5 步开挖锚索内力云图

从图 4~图 6 可以看出前面两排土钉的内力不随桩锚支护以后基坑的开挖而改变,其内力趋于稳定。而高压旋喷锚索的内力则随着基坑开挖深度的增加而不断变化,自由段顶部的拉力不断增大,由  $8.9935 \times 10^4$  N 增加到  $2.0328 \times 10^5$  N。锚固段底部的拉力不断减小,由  $7.3982 \times 10^2$  N 减小到 99.110 N。即高压旋喷锚索受力过程中,自由段顶部承载能力得到充分发挥,而锚固段底部承载能力的发挥欠佳,从许多类似工程的实测资料中可得出相同的结论<sup>[14-16]</sup>。

### 3.3 灌注桩围护体变形

桩锚支护结构体系灌注桩围护体变形形式有三种,分别是悬臂式,抛物线型和上述两种形式的组合<sup>[17]</sup>。本模型中灌注桩围护体用双面 Liner 单元来模拟, Liner 单元和实体单元的界面相对于周围介质是刚性的,但是能够发生滑移,并可能在预期荷载作用下产生张开<sup>[18]</sup>。FLAC<sup>3D</sup>5.0 中新增加的双面 Liner 比 FLAC<sup>3D</sup>3.0 中的单面 Liner 多一个接触面,更符合工程实际情况。各步骤下灌注桩围护体的变形如图 7 所示。

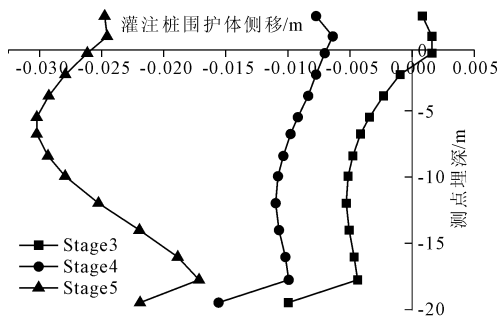


图 7 灌注桩围护体侧移

由图 7 可知,随着基坑开挖的加深,灌注桩围护体的水平位移逐渐增加,但是基本形式保持不变,大致接近于抛物线形,可以归结为组合形式。在第 3 步,由于高压旋喷锚索和平台衬砌的抗拉作用使桩顶位移稍微向基坑外侧移动,最大位移为 1.6 mm,随着基坑的继续开挖到达第 4 步,桩顶位移明显向坑内移动,最大位移将近 1 cm。最后一步(第 5 步)开挖完成之后,桩顶水平位移达到 2.475 cm,没有超过基坑支护结构监测警报值 3 cm,满足规范要求。围护体深层土体水平位移最大值为 3.022 cm,没有超过监测警报值 5.5 cm,满足规范要求。

### 3.4 基坑外土体沉降变形

依据工程实践经验,基坑外土体沉降变形有三角形和凹槽形两种典型形状<sup>[19-20]</sup>。本例中采用的摩尔-库仑本构模型计算回弹结果是不准确的,因为当采用摩尔-库仑模型时,体应变为负值,始终表现为体胀变形,计算的竖向变形始终为回弹变形<sup>[18]</sup>。土体回弹也会带动灌注桩围护体的上浮,造成计算结果偏差很大<sup>[21]</sup>。图 8 为基坑开挖支护不同步骤中基坑周边地表的沉降量。

由图 8 可以看出,在基坑每一步开挖支护的过程中,土体的回弹均已经带动了基坑周边土体的隆起,这显然与实际不符。在坑外沉降变形方面,摩尔-库仑模型的计算结果始终为较大的回弹变

形,相对来说,修正剑桥模型计算的基坑变形形式比较合理,计算结果与实测结果也比较接近。坑外土体最大沉降量为 1.905 cm,没有超过监测警报值 3.5 cm,满足规范要求。

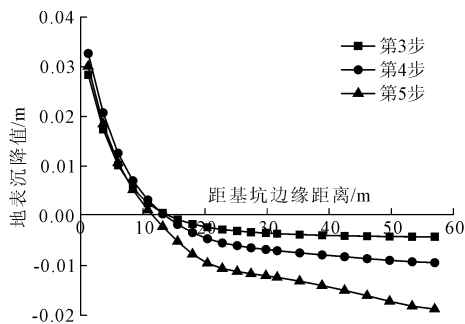


图 8 不同步骤的沉降曲线

## 4 结语

本文通过 FLAC<sup>3D</sup>有限差分软件对郑州市嘉辰丽景苑项目深基坑工程项目进行数值模拟,探讨了高压旋喷锚索与灌注桩支护结构的工作机理,得到了以下几点结论:

(1) 地面土体的水平位移随着基坑向下开挖不断增大,为了保持结构的稳定性在施工现场允许的条件下应尽量先放坡开挖,既节省材料又能够充分地保证结构的安全。

(2) 高压旋喷锚索的内力随着基坑开挖深度的增加,其自由段顶部的最大拉力不断增大,锚固段底部的最大拉力不断减小。

(3) 灌注桩围护体的水平位移随着基坑开挖的加深逐渐增大,且基本形式保持不变,其变形应为组合型位移形式。

(4) 在坑外沉降变形方面,摩尔-库仑模型的计算结果始终为较大的回弹变形,这与实际不符。

### 参考文献:

- [1] 张钦喜,尹宜成. 桩锚支护破坏形式及实例分析[J]. 工业建筑,2002,32(6):77-79.
- [2] 黄生根. 地基处理与基坑支护工程[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [3] 舒计城. 深基坑桩锚支护变形与内力实测研究[D]. 济南:山东建筑大学,2013.
- [4] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [5] 吕洋. 深基坑桩锚支护体系数值模拟及实例分析[D]. 贵阳:贵州大学,2009.
- [6] 张璐. 土钉墙与桩锚联合支护相互协同作用性能分析[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.

(上接第 197 页)

- [7] 黄志全,张瑞旗,王安明.基于 FLAC~(3D)的桩锚支护结构变形分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):68-72.
- [8] 王安明,张淋柄.基坑桩锚支护变形监测与数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):25-29.
- [9] 李育枢,谭建忠.桩锚支护体系在成都深基坑工程中的应用[J].铁道建筑,2011(5):77-80.
- [10] 闫文鹏.深基坑开挖变形与控制技术研究[D].青岛:山东科技大学,2011.
- [11] 郑荣跃,曹茜茜,刘干斌,等.深基坑变形控制研究进展及在宁波地区的买践[J].工程力学,2011,28(S2):38-53.
- [12] 赵笑男.深基坑开挖对邻近既有地铁隧道影响规律研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [13] 徐龙帅,倪万魁,刘魁,等.高压旋喷锚杆在黄土深基坑支护中的模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):134-139.
- [14] 张程林,彭炎华.深基坑桩锚支护数值模拟及参数分析[J].施工技术,2008,37(S2):321-324.
- [15] 陈娟.基坑桩锚支护体系现场试验与数值模拟研究[D].长沙:中南大学,2008.
- [16] 冯勇,李平,姜春艳.FLAC3D 在深基坑工程开挖中的数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):17-20.
- [17] 郝兵.临近地铁隧道的基坑支护变形控制[D].长春:吉林大学,2013.
- [18] 李佳宇.FLAC3D 快速入门及简单实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [19] 程建.成灌快铁深基坑变形规律监测及其支护结构优化研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [20] 梁韵.暗挖地铁车站设置原则与施工工法选取研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [21] 王涛.FALC3D 数值模拟方法及工程应用—深入剖析 FALC3D5.0[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.