

# 桩撑锚组合支护结构的三维数值分析

王召磊, 杨志银, 张俊, 姜晓光

(中国京冶工程技术有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054)

**摘要:** 随着中国城市化进程的加速发展, 在城市建设过程中正遇到越来越多的深基坑工程。深基坑向着更大、更深的方向发展, 而且大量工程处在市区, 场地小、环境要求苛刻, 基坑开挖带来的问题也越来越突出。桩撑锚组合支护结构是一种复杂的组合支护形式, 其影响因素众多, 目前设计理论尚不成熟。结合工程实例, 通过数值模拟和现场监测, 分析桩撑锚组合支护结构的受力和变形规律, 并对设计和监测提出了一些建议。

**关键词:** 桩撑锚组合支护; 数值模拟; 深基坑

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0230-03

**作者简介:** 王召磊(1985-), 男, 河北故城人, 硕士, 主要从事基坑工程方面的研究。E-mail: 125635928@qq.com。

## Three-dimensional numerical analysis of combined support structure of pile-strut bracing-anchor

WANG Zhao-lei, YANG Zhi-yin, ZHANG Jun, JIANG Xiao-guang

(Shenzhen Branch of China Jingye Engineering Corporation Limited, Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** With the acceleration of urbanization development, more and more deep excavation appear in urban construction. The deep excavations have developed towards greater and deeper direction, and large number of projects are located in the urban area. So, the problems caused by the excavation of foundation pits have become more prominent. As a complex excavation support form, the new combined supporting structure of pile-strut bracing-anchor has many influencing factors and its design theory is immature. Combined with the practical work, the laws of force and deformation of the combined supporting structure of pile-strut bracing-anchor are analyzed by means of theoretical analysis and field monitoring. According to the numerical results and track construction, some suggestions are given for its design and monitoring.

**Key words:** combined support of pile bracing-anchor; numerical simulation; deep excavation

## 0 引言

由于城市建设用地的限制, 建筑发展模式由平面型向地下或空间发展成为一大趋势。随着高层和超高层建筑的日益增多, 基坑的开挖深度也越来越深, 基坑周边的环境条件越来越复杂, 深基坑开挖的环境效应问题也日益突出, 给深基坑支护技术提出更高的要求<sup>[1]</sup>。笔者对中航城 D1 地块的基坑进行设计时, 提出了桩撑锚组合支护结构: 首层大跨度钢筋混凝土内支撑和下部多层预应力锚索结合的桩撑锚组合支护结构。

桩撑支护结构具有无需占用基坑外侧地下空间资源, 可以很好地保护周围地下管线, 提高整个围护体系的整体强度和刚度以及有效地控制基坑变形的优点, 其缺点是给土方开挖, 桩基施工和地下室的施工带来不便, 使工期延长。桩锚支护结构为挖土、结构施工创造了空间, 其缺点是需要占用基坑外侧资源, 且不宜在软土层中应用。桩撑锚新型组合支护形式, 在满足超深基坑设计要求的情况下, 比地连墙节省造

价, 结合了桩撑和桩锚支护结构的优点, 达到“刚柔并济”的效果。

本文结合工程实例, 对桩撑锚组合支护结构进行了三维数值模拟, 分析其受力和变形的规律, 并对设计和监测提出了一些建议。

## 1 工程概况

深圳中航城项目总占地面积 41562 m<sup>2</sup>, 分为 D1、D2、G/M、H 及 O 五个地块, 四周建筑环境复杂, 管线众多。D1 地块西邻华富路, 南靠振中路, 北侧为中航公寓大厦, 东侧为中航苑住宅区 (D2 地块), 占地面积约 7339 m<sup>2</sup>, 建筑面积为 101200 m<sup>2</sup>, 规划为 45 层的超高层写字楼, 建筑高度为 200 m, 设有三、四层地下室, 基坑周长约为 339 m, 基坑开挖深度约为 19.1~20.2 m。

场地原始地貌单元属冲积阶地—台地地带, 根据

钻探揭露, 场地内分布的地层有人工填土层、第四纪冲洪积层、坡洪积层和残积层, 下伏基岩为燕山晚期花岗岩。

基坑四周均采用桩围护体系, 护坡桩直径均为 1.2 m, 间距 1.7 m, 嵌固深度 6~8 m (实际施工时个别桩嵌固深度为 3 m)。在-0.5 m 标高处设置一道钢筋砼内支撑, 与冠梁形成平面闭合的框架结构, 对护坡桩形成支撑体系, 减少上部基坑变形, 并保证周边道路、管线和建筑安全。在内支撑交叉点设置立柱桩, 直径 1.0 m, 嵌固桩长 8 m。基坑内支撑下部采用预应力锚索, 为土方及地下室施工创造方便。锚索采用 4 根 7×5-Φ15.2 低松弛高强钢绞线制作, 其材料标准强度为 1860 MPa。锚索水平间距 1.7 m。

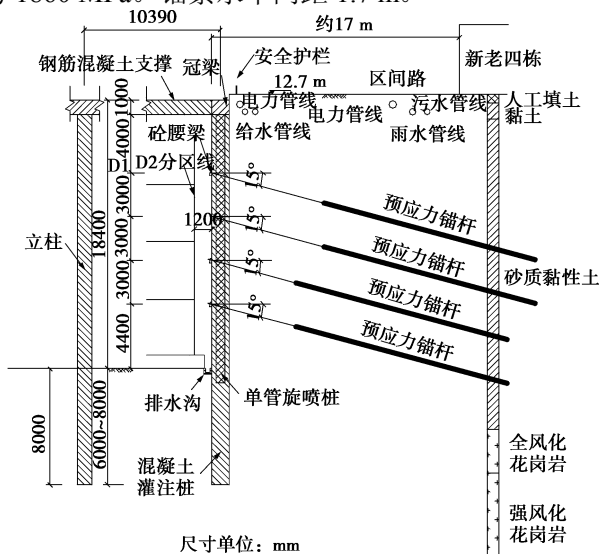


图 1 基坑支护剖面图  
Fig. 1 Section of excavation support

## 2 模型建立

### 2.1 计算模型

所建三维模型如图 2 所示。模型尺寸 270 m×320 m×50 m, 整个模型由 75260 个实体单元和 9266 个结构单元组成。

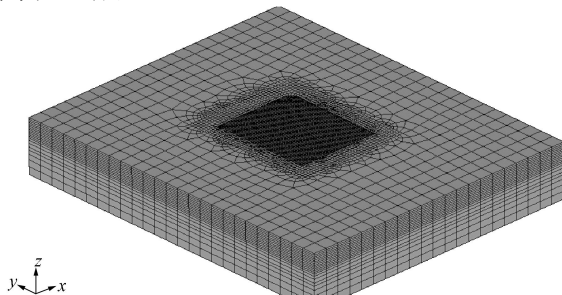


图 2 计算模型  
Fig. 2 Calculation model

所建模型土体采用摩尔-库仑弹塑性模型本构模型, 内支撑采用梁单元; 预应力锚索采用锚索单元; 立柱桩采用桩单元; 围护桩按照等刚度原理折算成地

下连续墙, 在不显著影响围护结构变形分析的前提下大幅度减少模拟计算的时间, 采用壳单元。

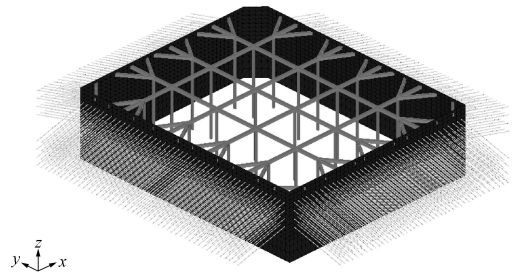


图 3 结构单元  
Fig. 3 Structural units

取地表为自由边界, 模型的前后 ( $y=-160$  和  $y=160$  m 处)、左右 ( $x=-135$  m 和  $x=135$  m 处) 限制其水平位移, 模型的底部限制水平位移和竖向位移。

### 2.2 施工工况的模拟

初始地应力生成之后, 所有位移清零, 本次模拟的施工工况主要分为 5 步: ①开挖至-0.7 m, 考虑应力释放, 计算一定时步, 围护桩, 立柱和支撑梁的施工 (激活相应单元); ②开挖至-6.2 m, 施工第 1 道锚索 (考虑应力释放, 每次开挖 1.5 m, 计算一定时步, 下面工况同样); ③开挖至-9.2 m, 施工第 2 道锚索; ④开挖至-12.2 m, 施工第 3 道锚索; ⑤开挖至-15.2 m, 施工第 4 道锚索; ⑥开挖至-19.2 m, 施工完毕。

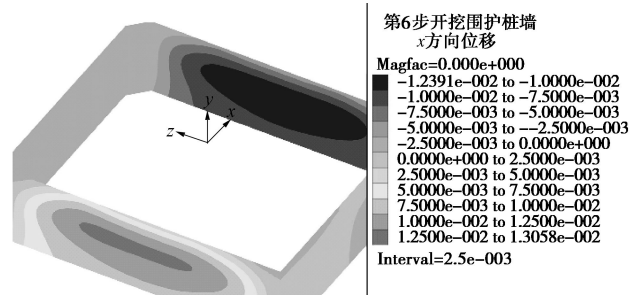


图 4 围护桩墙 x 方向位移

Fig. 4 X-direction displacement of pile retaining wall

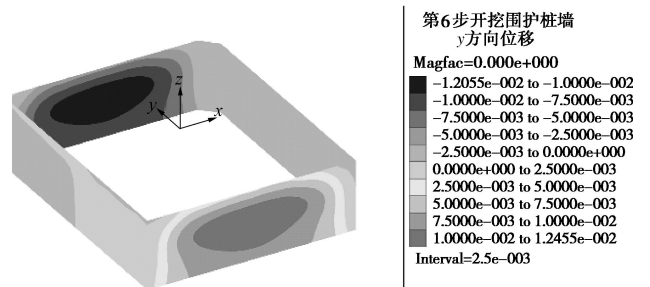


图 5 围护桩墙 y 方向位移

Fig. 5 Y-direction displacement of pile retaining wall

## 3 计算结果与分析

### 3.1 围护桩墙侧向变形分析

整个围护结构变形呈“鼓肚皮”形, 最大水平位移发生的位置在第 3 道锚索处。围护桩墙的侧向变形实测最大值为 12.24 mm, 与数值模拟最大值十分接

近。测斜变形计算时需确定固定起算点,起算点位置的设定分管(测斜管)底和管顶两种情况。当桩的嵌固深度较短时(如本工程个别桩嵌固深度仅为3 m),对于桩撑锚围护桩墙测斜监测建议:①一般情况下,对于桩撑锚支护结构,测斜以管底为基准点,能够较好地反映桩体的变形;②当桩的嵌固深度较短时(如本工程个别桩嵌固深度仅为3 m),在进行支撑施做(或支撑未达到设计强度)前的挖土时,围护桩的测斜监测,可以管底作为基准点。当上部支撑施做后,情况就发生了变化,此时管顶变形受到了限制,而原先作为基准点的管底随开挖深度的加大,将发生变形,因而建议将基准点转至管顶,由上而下累计某一深度的变形值,直至开挖结束。

### 3.2 地表沉降分析

由监测数据可知,基坑周围沉降最大值为14.9 mm。此监测点位于基坑与中航公寓之间的道路上。数值模拟时,基坑北侧的中航公寓为天然基础,考虑了150 kPa的超载,最大沉降为18.0 mm,与实测最大沉降相差3.1 mm,相差不大。

由图6可以看出,桩撑锚组合支护体系的地表沉降形状为凹槽形。

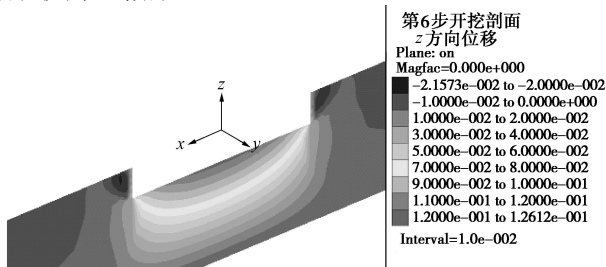


图6 土体z方向位移

Fig. 6 Z-direction displacement of soil

### 3.3 立柱沉降分析

本工程共布置了6个立柱沉降观测点。所测6个立柱全部下沉,最小为8.0 mm,最大沉降点为13.1 mm,而数值模拟结果为立柱全部上浮,最大上浮为3.4 mm。

数值分析,土体模型采用的是莫尔-库仑模型,其不能反映土体加载与卸载模量的差异,不能很好地模拟土体回弹。因此要通过数值计算预测立柱桩最终是抬升还是沉降比较困难,至于定量计算最终位移就更加困难了,所以要通过监测实施控制和调整。

### 3.4 支撑梁内力分析

最大轴力实测值为5522 kN,最大弯矩实测值为204 kN·m。数值模拟所得最大轴力为5804 kN(如图7所示),最大弯矩为1266 kN·m。计算轴力与实测十分接近。所得最大弯矩值与实测值相差较大,分析原因:因为监测点全部是位于支撑梁的中部,不是弯矩最大位置(设计时,可能仅仅考虑得到轴力,忽略了弯矩)。由图8,弯矩最大值位于八字撑节点处,且最大弯矩

监测点处的FLAC3D计算值为267 kN·m,与实测值比较接近。

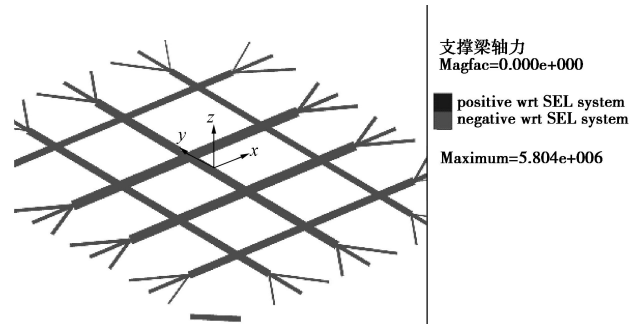


图7 支撑梁轴力

Fig. 7 Axial force of support beam

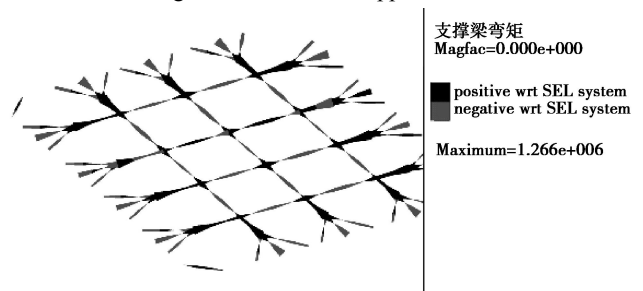


图8 支撑梁弯矩

Fig. 8 Moment of support beam

由上,建议设计增加八字撑节点处的内力监测,防止支撑梁由于弯矩过大而破坏。

## 4 结 语

桩撑锚组合支护结构是个复杂的空间结构体系,其影响因素众多。桩撑锚结构采用“围护内撑外拉”的方式保持基坑开挖条件下土体应力场处于静力平衡或动态平衡状态。通过三维数值模拟,可以较好反映支护结构的受力和变形,但立柱沉降的实测值与计算值存在较大差异,应通过监测实施控制和调整。由监测结果和计算结果可知,桩撑锚组合支护结构达到了良好的支护效果。

### 参考文献:

- [1] 杨志银, 张俊. 深圳地区深基坑支护技术的发展和应[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3377 - 3382. (YANG Zhi-yin, ZHANG Jun. Development and application of supporting techniques for deep foundation pit excavation in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3377 - 3382. (in Chinese))
- [2] 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. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))