

DOI: 10.11779/CJGE2014S2069

# 复杂软土地区深基坑内支撑与锚索共同作用初探

周赞良<sup>1</sup>, 付艳斌<sup>2</sup>, 丘建金<sup>1</sup>, 赵军<sup>2</sup>, 贺闯<sup>3</sup>

(1. 深圳市勘察测绘院有限公司, 广东 深圳 518028; 2. 深圳大学土木工程学院, 广东 深圳 518060; 3. 深圳市鹏瑞地产开发有限公司, 广东 深圳 518054)

**摘要:** 针对填海软土地区深基坑采用的排桩加上部内支撑、下部预应力锚索复合支护结构进行了分析, 基坑上部刚度较大的内支撑的存在有效减小了基坑的变形、优化了围护结构的受力, 下部预应力锚索可以为桩基提供施工所需空间、减小支撑与地下室施工的相互影响。通过现场监测情况及数值模拟初步探索了内支撑与锚索的共同作用, 体现了上撑下锚复合支护结构在软土地区的施工便利性及造价优越性, 可为类似工程提供参考。

**关键词:** 软土; 深基坑; 内支撑; 锚索; 共同作用

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0396-04

**作者简介:** 周赞良(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计及施工管理方面的工作。E-mail: zliang008@126.com。

## Interaction between internal bracing and anchor cable of deep foundation pits in complex soft soil areas

ZHOU Zan-liang<sup>1</sup>, FU Yan-bin<sup>2</sup>, QIU Jian-jin<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, HE Chuang<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Geotechnical Investigation and Surveying Institute Co., Ltd., Shenzhen 518028, China; 2. Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Shenzhen Parkland Real Estate Development Co., Ltd., Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** For the deep foundation pit in soft soil areas of coastal reclamation, the composite supporting structure, which is combined by row piles, upper inner support and the lower anchor is analyzed. The mechanical behaviour of the support system is optimized by the upper inner support with more stiffness. The space of pile foundation construction is provided and the interaction between support and basement construction is reduced by the lower anchor. Preliminary studies on interaction between support and anchor are made by analyzing the field monitoring and numerical simulation. The composite supporting structure is convenient in building and has advantage of cost in soft soils, and it may provide valuable references for similar projects in the future.

**Key words:** soft soil; deep foundation pit; inner bracing; anchor cable; interaction

## 0 引言

随着城市高层建筑和基础设施的大量兴建, 产生了大量深基坑开挖及其支护技术, 也伴随着不少新型支护结构形式, 比较典型的有预应力锚索柔性支护技术、内支撑与预应力锚索复合支护结构。而采用内支撑与预应力锚索复合支护结构具有诸多优点: 在满足工程安全性的前提下大大节省工程造价; 施工方便、工期短; 基坑变形小。由于内支撑与锚索共同作用, 改变了基坑的受力状态, 减小了基坑坑壁位移, 因此内支撑与预应力锚索柔性支护法特别适用于位移控制要求严格的复杂软土地区深基坑及超深基坑的支护。

杨芮等<sup>[1]</sup>对土钉和预应力锚索复合支护方式和土钉墙两种支护方式的基坑边坡稳定系数和边坡变形进行了分析。结果表明, 在土钉和预应力锚索的复合支护方式中, 预应力锚索的位置比较重要, 通常锚索的

位置越靠近坡顶, 则锚索发挥的作用越大, 效果越理想。冯艳辉等<sup>[2]</sup>采用岩土软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立深基坑桩锚支护结构的仿真模型, 并对支护结构中锚索的内力与变形进行数值模拟。数值模拟表明, 锚索在自由段的轴力和变形量最大, 从锚固段开始, 锚索的轴力和变形量逐渐减小, 最后趋于零。朱逢斌等<sup>[3]</sup>运用有限元软件 ADINA, 对某基坑框架预应力锚索柔性支护结构进行了数值模拟。数值模拟表明框架预应力锚索柔性支护结构在深基坑支护工程中控制变形的效果显著。黄雪峰等<sup>[4]</sup>对桩锚支护结构在不同阶段锚索的受力特征进行现场内力测试试验, 测得了锚索轴力和摩阻力随时间及空间分布规律, 分析了锚索支护过程边

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108270); 住房和城乡建设部项目(2010-k3-14)

收稿日期: 2014-07-28

坡潜在滑移面的动态演化规律, 探讨了预应力锚索自由段与锚固段相互关系。董诚等<sup>[5]</sup>、贾金青等<sup>[6]</sup>探讨了深基坑土钉墙和预应力锚杆复合支护方式对基坑边坡稳定系数和边坡变形进行了分析, 以及深基坑分别采用土钉墙和预应力锚杆支护方式的对比数值分析。

目前对锚索与内支撑共同作用支护机制的研究进行的较少, 缺乏对其工作机制的深入认识。本文结合深圳湾壹号深基坑工程, 提出了在复杂软土地区深基坑支护中采用内支撑与锚索共同作用的组合支护形式。利用 PLAXIS 程序进行有限元分析, 讨论了支护结构变形的影响因素及锚索和内支撑的方案组合比选。

1 工程概况及设计

1.1 工程概况

深圳湾 1 号项目位于深圳市东滨路与科苑大道交汇处西北角, 北离滨海快速路距离约 1400 m。东侧与内湾公园隔路相望, 东离内湖约 150 m, 离深圳湾约 1000 m, 距离深港西部通道约 800 m。北地块用地 13657.82 m<sup>2</sup>, 本工程是由一个直径为 42 m 的大环撑和两个直径 20 m 的小环撑组成的基坑; 设计 4 层地下室, 基坑开挖深度为 17.5 m, 基坑总平面图见图 1。

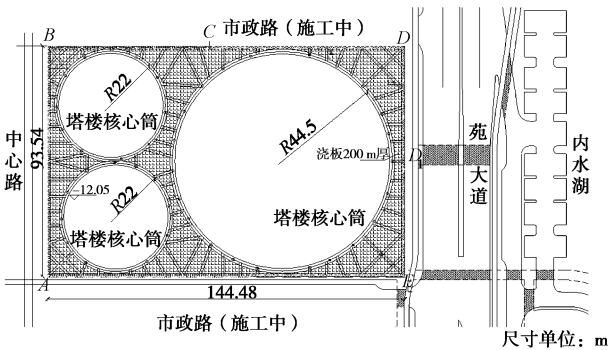


图 1 总平面图

Fig.1 Plan of excavation site

1.2 地质条件

拟建场地原始地貌为滨海, 后经填海而成, 场地地质条件复杂, 软土层深厚, 地下水丰富。根据勘察报告知地质特征见表 1。地下水主要为赋存于淤泥中的孔隙潜水, 水量丰富。地下水位埋深为 0.10~1.50 m。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils					
地层名称	厚度 H/m	c /kPa	φ /(°)	E <sub>s</sub> /MPa	γ /(kN·m <sup>-3</sup> )
淤泥	15	6.0	5.0	2.60	1.53
粗杂色黏土	8.3	22.0	18.0	6.00	1.92
砾质粉质黏土	7.0	26.0	24.0	8.50	1.87

1.3 设计方案

(1) 工程特点及难点

本工程设计和施工的主要难点和特点: ①地质条

件复杂, 地下水位高, 有深厚的淤泥, 淤泥中又含大量毛石、孤石等; ②基坑开挖深度大, 周边环境对基坑变形控制要求高; ③工期紧, 须便于工程桩及主体结构施工。

(2) 围护结构方案

根据场地周围的环境情况及场地的地层结构特征, 综合考虑工程桩的施工便利性, 采用如下钻孔灌注桩、锚索以及内支撑相互组合的基坑围护结构方案: ①在坑顶设置一个半径为 42 m 的大环撑和两个半径 20 m 的小环撑 (撑上封板以加强撑的刚度、也便于做后续施工作业平台), 既便于后续工程桩 (避开淤泥填石在坑底施工, 圆环内布置管桩, 撑下布置钻孔灌注桩) 和主体核心筒结构的施工, 又有利于控制基坑围护结构的变形; ②在基坑中下部设置三道预应力锚索, 既便于在坑底施工内支撑下面的灌注桩 (挖穿淤泥填石层后施工), 又有效降低了工程造价; ③在直径 1.2 m@1.8 m 的排桩后施工旋喷桩 (有填石区域) 或搅拌桩 (淤泥区域) 做止水帷幕。基坑剖面布置见图 2。

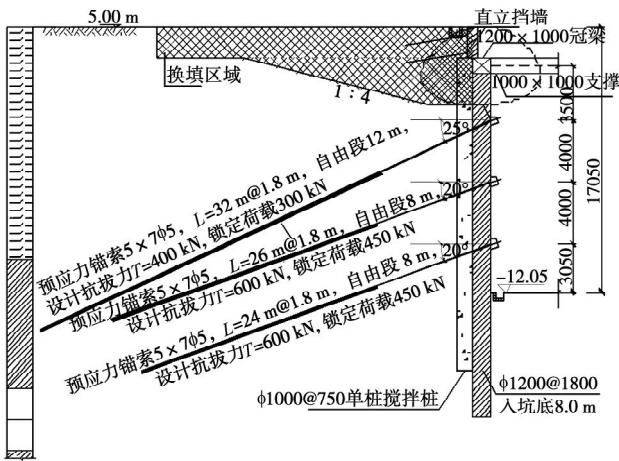


图 2 基坑剖面布置图

Fig. 2 Profile of excavation

2 数值模拟分析

2.1 数值分析模型建立

为研究深基坑中内支撑与锚索组合支护的共同作用, 采用 PLAXIS 数值模拟软件建立二维对撑模型进行分析, 在分析过程中本文采用 Mohr-Coulomb 本构关系来模拟基坑土体应力应变关系。根据地质条件和开挖深度来建立 PLAXIS 模型, 模型尺寸 60 m×40 m。本模型采用三角形单元自动划分网格, 边界约束采用底部固支, 两侧只固定水平方向, 从而能更好的模拟实际情况。网格划分如图 3 所示。

基坑开挖的具体实现步骤为: ①建立整个场地土体及支护结构模型; ②建立初始地应力场。建立自重

应力场，设立地下水位，建立初始渗流场。同时消除初始地应力变形。③分步挖土，每次开挖前先降水到遇开挖地层 0.5 m 下，然后进行土体开挖，土体开挖通过设置生死单元来实现。

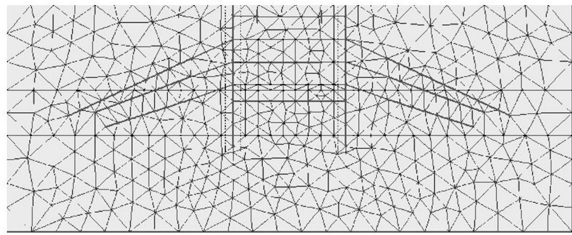


图3 模型网格划分  
Fig. 3 Mesh of model

数值模拟严格按照实际工况进行，先进行钻孔灌注桩与止水帷幕的施工，然后分 5 层开挖土方，共挖深 17.5 m。基坑开挖严格按照“先撑后挖”顺序进行。考虑基坑土体的渗流效应，每次开挖前先降水到预开挖地层 0.5 m 下。

2.2 内支撑与锚索共同作用分析

(1) 支撑刚度的影响

图 4 为采用刚度不同的混凝土支撑与钢管支撑情况下锚索拉力在锚固段的变化情况。分析表明：钢管撑和混凝土支撑对锚杆轴力影响较小。主要原因是无论钢管撑和混凝土支撑的刚度相对于锚索均较大，支撑所在位置变形相对很小，所以支撑刚度的差异对基坑变形及锚索拉力影响较小。

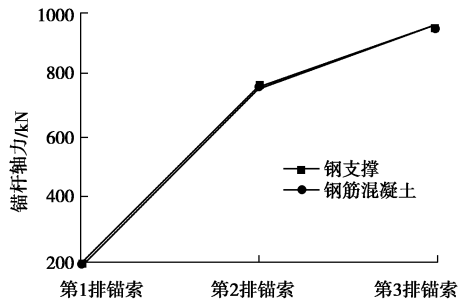


图4 两种支护方案的锚杆内力图

Fig. 4 Stress of prestressed anchor cable of two support schemes

(2) 支撑位置的影响

为研究内支撑与锚索共同作用下内支撑最优设计位置，将内支撑先后设计在四道撑（锚）处。4 种方案开挖到坑底的支护结构的水平位移结果如图 5 所示。结果表明：内支撑设立在第一道支撑处，支护结构水平位移最大；无论哪种支撑方案，水平位移最大均显示为第三道位置（即坑下 10 m 处）最大；内支撑设立在第三道支撑处，基坑水平位移最小，仅为设立在第一种方案的基坑最大变形的 71%。该图也同时表明内支撑的最优位置是距基坑坑底 0.4 倍基坑深度左右。

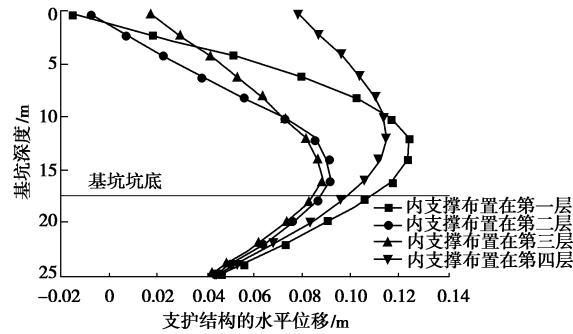


图5 4种支护方案的水平位移图

Fig. 5 Horizontal displacement of four support schemes

图 6 表明 4 种支护方案下内支撑位置的变化对支护桩的弯矩影响较大：内支撑设立在第一道支撑处，支护结构弯矩最大；内支撑设立在第四道支撑处，距离坑底最近时，支护结构弯矩最小；当混凝土内支撑设立在第三道支撑处，支护结构弯矩分布较均匀，结构受力性能较优。

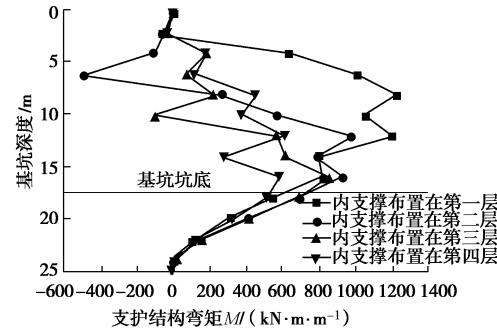


图6 四种支护方案的弯矩图

Fig. 6 Bending moment of four support schemes

图 7 表示混凝土内支撑在不同撑（锚）处所受轴力。当混凝土内支撑布置在基坑第三道支撑处时受力较大，更能发挥支撑的作用。

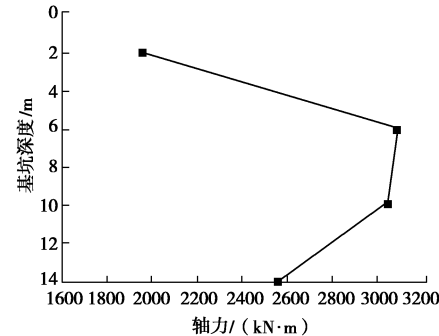


图7 内支撑在不同位置的轴力图

Fig. 7 Axial force of support at different locations

本案例因考虑到撑下灌注桩施工（地表施工因淤泥填石等的影响难以成孔）的净空高度需要，将内支撑布置在基坑上部；同时锚索布置在下部较好土层，可以节省锚索穿越淤泥层的自由段长度。

2.3 数值模拟结果与现场监测比较分析

图 8 为基坑分层开挖实测数据和数值模拟结果

对比。分析表明,混凝土内支撑设置在第一道支撑处,基坑顶部变形较小,限制了坑顶的位移,随着基坑的逐层开挖,位移形状逐步向“鼓肚子”发展,基坑最大水平位移逐步下移,到基坑开挖完成时,最大位移处距离基坑底约 5 m。

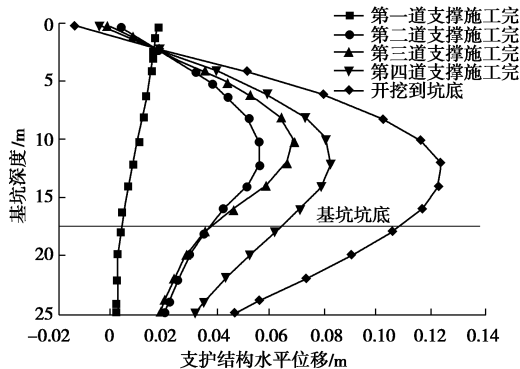


图 8 支护结构的水平位移图

Fig. 8 Horizontal displacement of supporting structure

弯矩分析如图 9 所示,基坑开挖到第三道支撑,支护结构负弯矩已经呈最大,随后基坑开挖,支护结构整体弯矩继续增大,开挖至基坑坑底时,支护结构所受弯矩达到最大,且基本呈正弯矩。

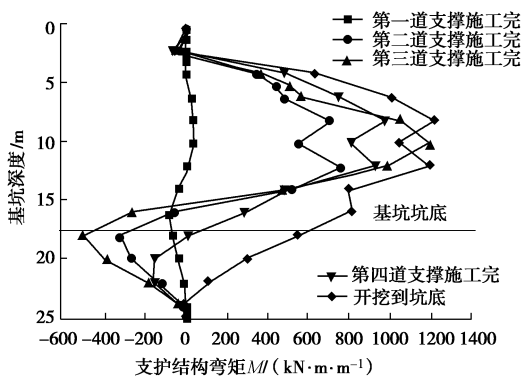


图 9 支护结构的弯矩图

Fig. 9 Bending moment supporting the structure

### 3 结 论

(1) 在软土地区基坑工程中,采用上部刚度较大的钢筋混凝土内支撑显著降低了基坑的变形,基坑下部采用预应力锚索而不用内支撑可以为工程桩和坑内土方开挖提供作业空间、减少支撑与地下室施工的相互影响。本工程实例表明:针对填海地区上层淤泥、下层强度较高的黏土的地质条件,采用上撑下锚的基坑支护结构方案技术可行、施工便利同时具有极大经济优越性。

(2) 通过内支撑设置在不同支撑位置来初步探索支撑与锚索的共同作用,无论何种支撑方案,水平位移最大均显示为第三道位置(即坑下 10 m 处)最大;内支撑设立在第三道支撑处,基坑水平位移最小。

同时弯矩分析表明,当混凝土内支撑设立在第三道支撑处,支护结构弯矩分布较均匀,结构受力性能较优。因此,无论从基坑水平位移和内力均表明内支撑的最优位置是距基坑坑底 0.4 倍基坑深度左右。

### 参考文献:

- [1] 杨 芮, 习志锐, 潘少华. 深基坑支护方案优化及其应力应变分析[J]. 水电能源科学, 2013(12): 143 - 146. (YANG Rui, XI Zhi-rui, PAN Shao-hua, et al. Scheme optimization and stress-strain analysis of retaining and protecting for deep foundation excavation[J]. Water Resources and Power, 2013(12): 143 - 146. (in Chinese))
- [2] 冯艳辉, 王武刚, 杨 媛. 预应力锚杆复合土钉墙在云南某基坑工程应用中的改进[J]. 建筑结构, 2013, 24: 72 - 75. (FENG Yan-hui, WANG Wu-gang, YANG Yuan. Improvement of prestressed anchor and composite soil nailing wall in an foundation pit engineering in Yun nan province[J]. Building Structure, 2013, 24: 72 - 75. (in Chinese))
- [3] 朱逢斌, 缪林昌, 顾欢达, 等. 桩墩扶壁复合土钉墙设计参数的敏感性分析[J]. 工业建筑, 2013, 11: 77 - 83. (ZHU Feng-bin, MIAO Lin-chang, GU Huan-da, et al. Sensitivity analysis of design parametes of composite wall with bored piles in deep excavation[J]. Industrial Construction, 2013, 11: 77 - 83. (in Chinese))
- [4] 黄雪峰, 马 龙, 陈帅强, 等. 预应力锚杆内力传递分布规律与时空效应[J]. 岩土工程学报, 2014, 42(4): 1165 - 1172. (HUANG Xue-feng, MA Long, CHEN Shuai-qiang, et al. Distribution characteristics and time-space effect of internal force for prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 42(4): 1165 - 1172. (in Chinese))
- [5] 董 诚, 郑颖人, 陈新颖, 等. 深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3793 - 3796+3802. (DONG Cheng, ZHENG Ying-ren, CHEN Xin-ying, et al. Research on composite support pattern of soil nails and prestressed anchors indeep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3793 - 3796, 3802. (in Chinese))
- [6] 贾金青, 郑卫锋, 陈国周. 预应力锚杆柔性支护技术的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(21): 180 - 184. (JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng. Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(21): 180 - 184. (in Chinese))