

# 紧临地铁站基坑支护设计与变形控制

刘焕存, 黎良杰, 王程亮, 魏海涛

(中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100098)

**摘要:** 北京某紧临地铁站的基坑深达 15 m, 支护安全度要求高、变形控制严格。通过对现场条件和设计要求的分析, 提出了控制变形的实用设计及施工方法。设计中采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 对基坑支护体系的变形进行模拟分析; 基坑施工及使用中对基坑实际变形进行了监测。数值计算及变形监测数据显示基坑坡顶最大变形均满足相关规范要求, 基坑支护取得了良好的效果。基坑支护的设计及施工中的变形控制措施是对紧临地铁站基坑支护工程的探索与尝试, 对类似条件下的基坑工程也具有一定的参考价值。

**关键词:** 深基坑支护; 现场实测; 变形控制

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0654-05

**作者简介:** 刘焕存 (1962-), 男, 研究员, 中航勘察设计研究院有限公司副总工程师, 主要从事岩土工程设计、施工、研究。E-mail: lhc2421@126.com。

## Design and deformation control of excavation support project close to a subway station

LIU Huan-cun, LI Liang-jie, WANG Cheng-liang, WEI Hai-tao

(AVIC Institute Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100098, China)

**Abstract:** For the deep excavation with a depth of 15 m close to a subway station in Beijing, the design and deformation control measures for its support are proposed. Numerical simulation is performed by means of the FLAC<sup>3D</sup> software based on the theory of finite difference to analyze the deformation of the supporting system during the design stage. The actual deformations of the supporting system during the construction stage and service period are monitored. The results of the numerical simulation and actual monitoring show that the maximum deformation on the top of the supporting structure is below the allowable value of the relevant technical code. The proposed design and deformation control measures for this project can be referenced for excavation support projects under similar conditions.

**Key words:** deep excavation support; field measurement; deformation control

## 0 引言

城市地铁站一般在城市人口密集、建筑林立的区域规划建设。对紧临已投入运营的地铁站的基坑支护工程, 其设计与施工都面临着极大的风险和难度: 不仅要满足基坑的稳定性与变形要求, 还要严格保证地铁站以及站内列车的安全正常运行。地铁人群出入交织, 人流密集, 一旦出现意外其后果难以预料。

本文介绍了紧邻北京地铁 10 号线与地铁 5 号线交叉换乘站深达 15 m 的基坑支护工程设计和施工, 以及根据施工中所遇到的困难所作的动态调整, 对基坑整体支护情况进行了系统总结, 并根据基坑开挖工况, 对紧临的地铁可能受到的变形影响进行了数值模拟分析, 并与基坑坡顶的实际变形观测资料进行了对比分析, 为今后类似工程的设计与施工提供有益参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程概况

拟建科研办公楼位于北京市朝阳区, 地上 11 层, 地下 3 层, 总高度为 45.0 m, 基础埋深 14.30 m, 拟采用框架剪力墙结构, 筏形基础, 基坑面积约为 7500 m<sup>2</sup>。本基坑工程东临地铁五号线和地下市政管线, 南临地铁十号线, 北侧紧邻一栋 6 层住宅, 西北侧紧邻一栋 20 层住宅。建设场地环境总平面图见图 1, 东侧地面现状见图 2, 可见周边情况异常复杂, 设计与施工难度极大。

### 1.2 工程地质资料

基坑支护深度范围内的土层主要为粉质黏土素填土、砂质粉土、粉质黏土、黏质粉土, 各主要土层物

理力学参数见表 1。

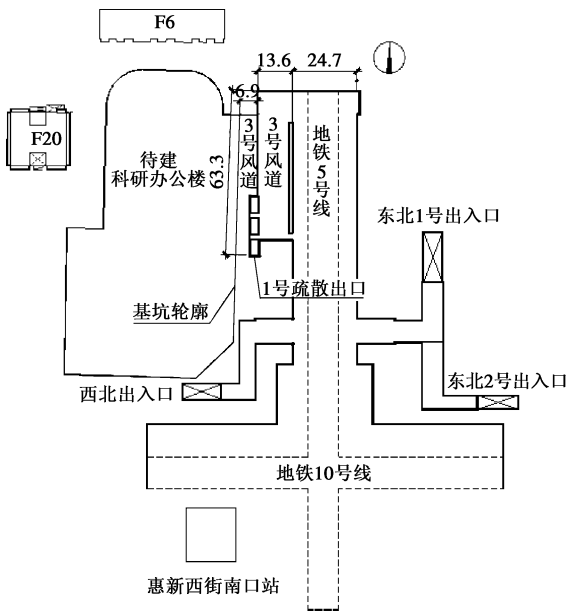


图 1 建设场地总平面图

Fig. 1 General plan of construction site

表 1 土层物理力学参数指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil layers

层号	土层名称	土层厚度 /m	含水率 w/%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$
①	粉质黏土 素填土	0.9~5.0	18.5	15	10
②	砂质粉土	1.5~5.4	19.7	7.8	32.1
③	粉质黏土	3.5~5.2	22.3	30.6	12.5
④	粉质黏土	$\geq 20.6$ m	20.4	32.0	14.2

场地内有一层地下水，地下水类型为潜水。静止水位埋深 3.5~6.8 m，主要含水层为砂质粉土②层、粉质黏土③层以及粉质黏土④层。

## 2 基坑支护结构设计

### 2.1 西侧、北侧基坑支护设计

西侧、北侧基坑支护设计，考虑坡上相邻建筑物的荷载、基础埋深、基础形式，按常规理论进行设计计算，采用上部土钉墙+下部桩锚支护形式。

土钉墙高度 2.0 m，1:0.3 放坡，布置一排土钉，土钉杆体采用  $\Phi 18$  钢筋，水平间距 1.5 m，土钉长度 5.0 m，位于地表之下 1.3 m。

护坡桩桩长 19 m，桩径 0.8 m，嵌固深度 4.7 m，桩顶标高-2 m，桩间距 1.6m。护坡桩内钢筋笼长 19 m，配主筋 14 $\Phi 22$ ，箍筋  $\Phi 6.5@200$ ，加强固定筋  $\Phi 14@2000$ ，砼强度均为 C25。冠梁规格 800 mm $\times$ 500 mm，冠梁箍筋： $\Phi 6.5@200$ ，砼强度 C25，保护层厚度为 50 mm。护坡桩锚杆设计参数见表 2。

### 2.2 南侧基坑支护设计

基坑南侧距地铁十号线运行线路较远(约 26 m)，但基坑东南角即为地铁站出入口，站口地下基础为倾斜式筏板基础，埋深由浅变深，水平向无放坡空间，为此上部 2 m 设计为直立砖混挡墙，下部桩锚支护形式。

挡土墙砌筑在桩顶冠梁上，厚度为 370 mm，采用砖砌，挡土墙内部用  $\Phi 6.5$  钢筋设置两道加强筋。每隔 3.2 m 设置一列构造柱，构造柱采用强度标号为 C25 的混凝土。

护坡桩桩长 17 m，桩径 0.8 m，桩顶标高-2 m，嵌固深度 4.7 m，桩间距 1.6m。护坡桩内钢筋笼长 17 m，配主筋 14 $\Phi 22$ ，箍筋  $\Phi 6.5@200$ ，加强固定筋  $\Phi 14@2000$ ，砼强度均为 C25。冠梁规格 800 mm $\times$ 500 mm，冠梁箍筋： $\Phi 6.5@200$ ，砼强度 C25，保护层厚度为 50 mm (护坡桩锚杆设计参数见表 3，南侧支护情况见图 3)。

### 2.3 东侧基坑支护设计

#### (1) 难点分析

基坑东侧紧临地铁五号线风道、疏散通道以及地面临时排风罩。拟建建筑地下一层为外挑结构，外皮线超出地下二层、三层外墙皮线 2.1 m。该外挑结构为预留与地铁通风道接口。地下一层结构外皮距地面排风管水平距离 0.3 m，距地面排风罩 2.0 m，距地铁构筑物结构外皮 3.4 m，下部结构外皮距地铁构筑物结构外皮 5.5 m。拟建建筑物与排风罩之间还铺设若干条正在运行的排风管，地面以下还埋设有污水管，



图 2 基坑东侧现状地貌

Fig. 2 Current landform at east side of construction site

表2 锚杆设计参数 1

Table 2 Design parameters of anchor rods (No. 1)

位置	长度/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	间距/m	钢绞线	工字钢腰梁	倾角/(°)	锁定荷载/kN
第1道	-5.0	20.0	7.0	13.0	3×7φ5	2根 20b	20	210
第2道	-8.0	22.0	6.0	16.0	3×7φ5	2根 22b	15	300
第3道	-11.0	22.0	5.0	17.0	3×7φ5	2根 22b	15	300

表3 锚杆设计参数 2

Table 3 Design parameters of anchor rods (No. 2)

位置	长度/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	间距/m	钢绞线	工字钢腰梁	倾角/(°)	锁定荷载/kN
第1道	-5.0 m	20.0	7.0	13.0	3×7φ5	2根 20b	15	230
第2道	-8.0 m	22.0	6.0	16.0	3×7φ5	2根 22b	15	330
第3道	-11.0 m	22.0	5.0	17.0	3×7φ5	2根 22b	15	330



图3 基坑南侧支护情况

Fig. 3 Bracing and retaining structures at south side of excavation 场地条件极其复杂。由于地下一层的外挑，使得护坡桩桩顶标高必须降至-6.5 m，为此，上部6.5 m深度范围护坡结构只能选择直立支撑结构（结构相互关系见图4）。

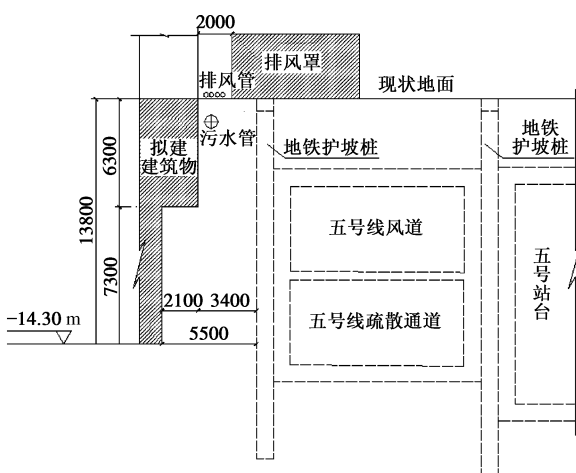


图4 基坑东侧与地铁结构关系图

Fig. 4 Relationship between bracing and retaining structures and subway structures

根据现场情况，场地东侧施工空间狭小，周边环境复杂，采用单一的桩锚支护形式难以满足后续结构

施工的要求，且锚杆施工长度有限，不能充分发挥拉锚作用，只能采用大角度锚杆来增加锚杆长度，且锚杆位置需与原地铁护坡桩位置错开。

这样不仅可以满足基坑本身的稳定性要求，还能确保控制地铁结构的变形，为后期拟建建筑物结构施工提供足够的空间。

#### (2) 基坑支护设计与变形控制方法<sup>[1-2]</sup>

综合考虑基坑周边环境条件与施工的可行性，经过充分的分析计算，基坑东侧最终采用上部直立预应力土钉墙+下部桩锚的支护形式。直立预应力土钉墙可以最大限度地节约空间，且直立板墙面也可作为地下一层外防水的胎膜，这样有效地解决了支护空间的矛盾。下部大角度桩锚也可有效控制基坑变形，减小基坑开挖对地铁构筑物的影响。

预应力土钉墙杆体采用 DN25 钢管，钢管做成注浆花管，对位于填土层中的土钉进行超前小导管注浆，以增强此部分有限土体的结构强度与整体性。土钉成孔深度根据地层条件与距离地铁构筑物的距离进行确定，土钉杆体倾斜角 10°，横向间距 0.85 m，横向土钉之间设置#10 槽钢横梁，土钉端部用#25 螺栓拧紧固定。共设置 4 排土钉，纵向间距 1.1 m，纵向土钉之间设置截面尺寸 0.25 m×0.25 m 的暗柱，暗柱采用在土模中干喷混凝土的方式成型。暗柱主筋与地面拉锚筋连接，地面拉锚筋设置在尽可能远处。

考虑到施工的便利性，护坡桩从地面开始施工，上部 6.5 m 范围内不放置钢筋笼为素混凝土桩，兼做临时支护，以便在下一步喷护施工时分段凿除方便。护坡桩桩径 0.8 m，嵌固深度 4.7 m，桩间距 1.7 m。护坡桩内钢筋笼长 12 m，配主筋 14Φ22，箍筋 Φ6.5@200，加强固定筋 Φ14@2000，砼强度均为 C25。护坡桩下部设置一道大角度锚杆，倾角 55°，锚杆从原有地铁护坡桩中间穿出，避开地铁结构，达到有效锚固

长度 (基坑东侧支护设计详图见图 5)。

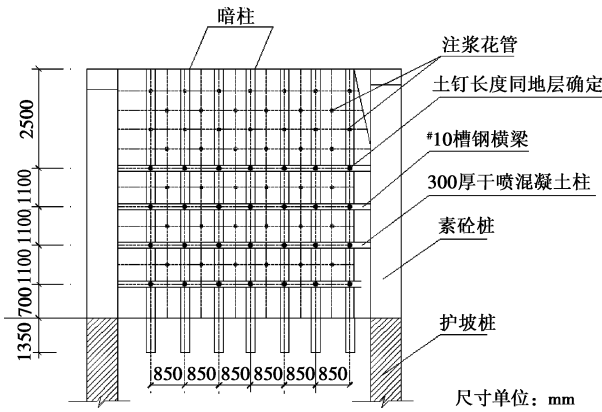


图 5 基坑东侧支护设计详图

Fig. 5 Bracing and retaining structures at east side of excavation

此支护方案既发挥了直立预应力土钉墙的节约空间、施工灵活, 又利用了桩锚结构较强的控制变形能力。二者结合, 充分满足了基坑支护的各方面要求, 取得了良好的支护效果 (基坑东侧支护情况见图 6)。

### 3 基坑开挖对轨道变形影响模型分析

#### 3.1 模型建立

由于基坑东侧紧邻地铁五号线风道及站台, 基坑开挖对地铁既有构筑物的影响是值得关注的焦点。在开挖前, 采用数值手段模拟基坑开挖全过程以指导施工是有必要的。本次模拟采用国际认可度较高的 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件。

点总数为 30859。本文研究的土体以粉质黏土为主, 属于弹塑性材料, 在 FLAC<sup>3D</sup> 程序中采用莫尔 - 库仑 (Mohr-Coulomb) 屈服准则。锚杆、面层、格构柱均采用结构单元模拟, 风道结构、五号线站台结构、护坡桩、采用网格单元模拟 (东侧支护模型网络分析见图 7)。

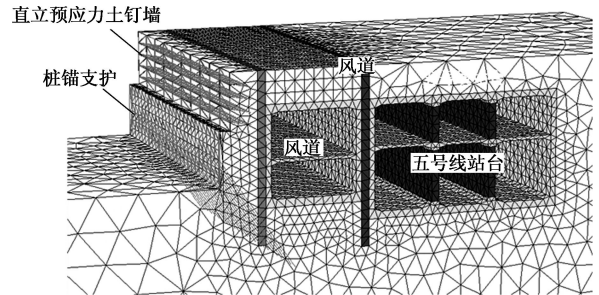


图 7 基坑东侧支护模型网络分析图

Fig. 7 Numerical model mesh for east side of excavation

#### 3.2 计算结果

限于篇幅, 本文仅选取最直观的水平位移分析。根据计算: ①基坑分步开挖支护后, 开挖至第三步 (深 4.7 m) 基坑坡顶最大位移达到 2.5 cm, 计算最大位移值约 3.02 cm。②基开挖支护完成后, 地铁风道及站台结构最大水平位移为 4.26 mm, 结构体最大差异变形 1.05 mm。根据相关规范, 地铁车站单侧卸荷条件下, 地铁结构最大水平位移量须小于 10 mm, 因此本基坑开挖支护对既有车站影响满足相关规范要求 (东侧支护模型网络 x 向位移计算云图见图 8)。

### 4 基坑开挖变形观测与数据分析

#### 4.1 基坑位移变形观测方法

位移观测点布置于基坑上口, 观测点的距离不大于 25.0 m。位移观测采用经纬仪进行观测。在槽边设视准线, 假定视准线静止不动, 用带有刻度的标尺放在观测点上, 读取数值。

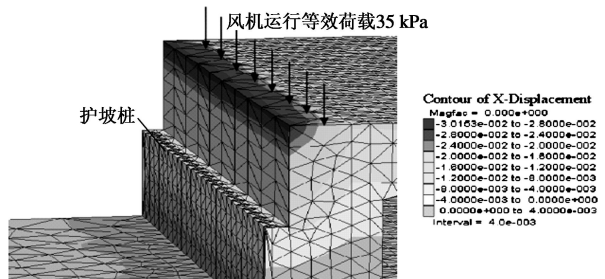


图 8 基坑东侧 X 向位移计算云图

Fig. 8 Nephogram of X-displacement at east side of excavation

模型建立选取计算长度约 40 m (基坑东侧支护长度), 整个模型取 98.5 m × 40 m × 33.8 m 的分析区域, 网格采用四节点四面体单元, 单元总数为 173951, 节

基坑开挖前对基坑边坡观测一次, 在开挖过程中, 每隔一天观测一次; 变形速率大于 2 mm/d 时, 每天观测一次; 变形速率大于 5 mm/d 时, 连续观测并启

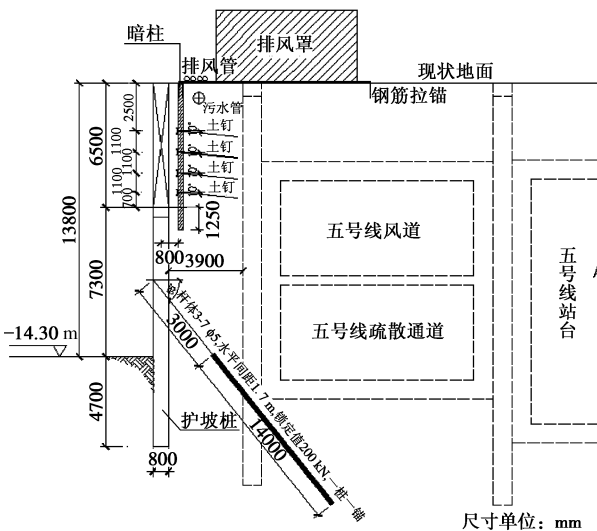


图 6 基坑东侧支护情况

Fig. 6 Design of bracing and retaining structures at east side of excavation

动应急预案；基坑开挖到槽底一周且变形稳定后，每周一次。

### 4.2 锚索锚头变形观测

锚杆张拉的同时，安装钢弦式测力计，基坑四边各设一组。安装前测一次钢弦频率初始值，锁定后测一次，然后每天定时测一次，如发现异常应增加测试次数。以基坑南侧第二道锚杆锚头监测数据为例（说明：1~3 开挖阶段，4~9 为基坑维护阶段）。根据内力监测数据可看出，锚杆内力随着基坑开挖变化较大，但均在可控范围内；基坑支护完成后，周边条件（荷载、水文等）条件（荷载、水文等）未发生变化，基坑维护期间锚杆内力基本不变。锚杆张拉的同时，安装钢弦式测力计，基坑四边各设一组（基坑南侧锚头内力实测曲线见图 9）。

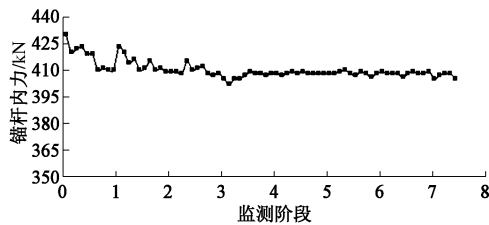


图 9 基坑南侧锚头内力实测曲线图

Fig. 9 Curve of measured stress on anchor head at south side of excavation

### 4.3 基坑变形观测分析

从基坑开挖至基坑回填，总计对基坑水平变形进行了 6 个月的观测，特别对临近地铁的基坑东侧以及南侧部分进行了重点观测，观测结果见图 10 和图 11。

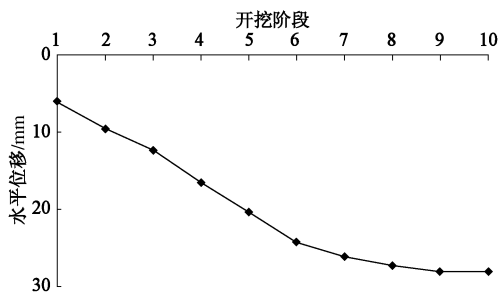


图 10 基坑东侧水平实测位移曲线图

Fig. 10 Curve of measured horizontal displacement at east side of excavation

从以上曲线可以看出，东侧及南侧基坑顶部水平位移总位移量都控制在合理的范围之内，且随着时间

的推移，水平变形趋于稳定。基坑东侧及南侧临近建筑物的变形很小，可以忽略，尤其是基坑东侧地铁构筑物及地面、地下各种管线基本没有受到基坑开挖的影响，均保持正常运转，以此看出，基坑支护取得了良好的效果。

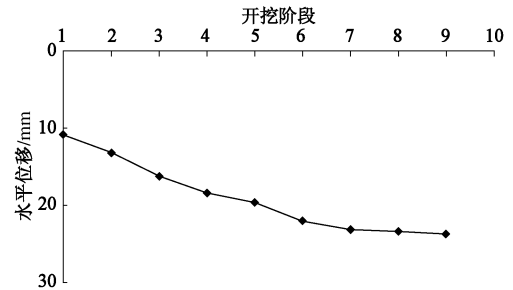


图 11 基坑南侧水平位移观测曲线图

Fig. 11 Curve of measured horizontal displacement at south side of excavation

## 5 结 论

(1) 当基坑支护临近地铁等重要构筑物时，要充分考虑周边环境条件因素及基坑本身的支护要求来慎重选择适宜的支护方案。

(2) 随着复杂基坑的逐渐增多，多种支护方案的结合应用是现代基坑支护设计的发展方向，方案设计时，应充分发挥各支护方案的优势，综合解决基坑支护中遇到的难题。

(3) 本工程设计不仅满足基坑本身的稳定性要求，且满足地铁结构的变形要求，保证了地铁的运行安全，工程设计施工取得了圆满成功。为今后类似工程的设计与施工提供有益参考。

### 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: 731 - 770. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 731 - 770. (in Chinese))

[2] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. (JGJ120—99 Building foundation pit supporting technical regulations[S]. 1999. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)