

# 上海某超深基坑逆作法施工变形的有限元分析

王晓锋<sup>1,2</sup>, 陈有亮<sup>1</sup>, 孟伟波<sup>1</sup>, 杨振坤<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200002)

**摘要:** 利用 Plaxis 有限元软件, 对上海市某超深基坑逆作法施工进行模拟计算, 分别分析了地下连续墙插入比、灌注桩数量、临时支撑等对基坑变形的影响。将计算结果的变形规律进行分析, 得到超深基坑的一般变形规律和变形控制要点。结论可用于超深基坑的变形预测和设计优化。

**关键词:** 有限元; 超深基坑; 基坑变形; 逆作法施工

中图分类号: TV551.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0192-04

## FEM analysis of construction deformation of top-down method for ultra-deep excavation in Shanghai

WANG Xiaofeng<sup>1,2</sup>, CHEN Youliang<sup>1</sup>, MENG Weibo<sup>1</sup>, YANG Zhenkun<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** Plaxis (FEM) software was used to simulate a ultra-deep excavation constructed by top-down method in Shanghai. The paper analyzed the influence of insertion ratio of underground diaphragm wall, number of pile and temporary support on deformation respectively. It analyzed the general deformation law of calculation result, and got the general deformation law of ultra-deep excavation and the control points of deformation. The conclusions can be used for the deformation prediction and design optimization of ultra-deep excavation.

**Key words:** FEM; ultra-deep excavation; excavation deformation; top-down method construction

## 1 研究背景

近年来,随着中国城市的不断发展,人们越来越重视地下空间的开发和利用,基坑工程呈现出“深、大、近、紧、难”的特点<sup>[1]</sup>,一个个超深基坑不断出现。例如,润扬长江大桥北锚碇基坑平均开挖深度达到 48 m;上海地铁董家渡修复工程开挖平均深度达到 38 m;北京国家大剧院工程基础埋深最大达到 32.5 m;北京国际新闻文化中心的基坑平均开挖深度 22.96 m;上海外环隧道浦西暗埋段基坑、世博变电站等基坑的开挖深度都达到了 30 m 以上<sup>[2]</sup>。

基坑开挖深度越大,被动区卸土量越多,围护结构承受的被动土压力越大,发生的变形量也越大。当围护结构变形量过大时,可能会影响施工,甚至出现基坑坍塌。逆作法是近些年发展的一种新型深基坑支护技术,是以层板结构永久支撑代替传统的临

时支撑,结构层板、立柱桩和地连墙组成一个整体,地连墙在施工阶段起基坑围护作用,在使用阶段承担地下结构外墙功能<sup>[3]</sup>。逆作法施工过程中,桩基的数量、地下连续墙的插入比、是否设置临时支撑等因素将对地下连续墙的变形产生不同程度的影响。之前已经有不少学者对逆作法施工的基坑变形特性进行分析<sup>[4-7]</sup>,并得到一些指导性结论。

本文结合上海地区某地下变电站逆作深基坑工程,进行基坑开挖施工工程的数值模拟,将模拟结果与工程实测数据比较,并分析不同因素对地下连续墙侧向变形的影响,为今后的逆作法工程实践提供借鉴。

## 2 基坑工程实例

### 2.1 工程概况

本文有限元模型来源于上海地区某地下变电站的超深基坑。基坑平面形状为近似矩形,长与宽分

收稿日期:2015-11-08; 修回日期:2016-05-11

基金项目:上海市自然科学基金项目(14ZR1428200)

作者简介:王晓锋(1982-),男,江苏南通人,硕士研究生,工程师,主要从事岩土工程数值计算。

通讯作者:陈有亮(1966-),男,河北故城人,博士,教授,主要从事岩土力学和边坡稳定性方面的研究。

别为 166.0、68.4 m。工程采用逆作法工艺施工,地下室主体结构与围护结构相结合。采用 1 200 mm 厚地下连续墙作为围护结构,开挖深度为 24 m,为超深大厚度地下连续墙。地下室区域基础底板厚度为 2 200 mm,考虑 300 mm 厚垫层。基坑在逆作法施工过程中,利用主体地下结构 3 层结构梁板作为开挖阶段的内支撑体系,在梁板竖向跨度大的跨中位置架设二道临时内支撑作为辅助的坑内支护体系。逆作阶段通过预留出土口出土,对出土口边梁及四个角部进行加固,出土口待逆作施工结束后结合主体结构需要进行封闭。地下变电站基础形式采用桩基筏板基础;工程桩为  $\phi 1000$  和  $\phi 800$  钻孔灌注桩,底板厚度为 2 200 mm,桩身有效长度为 56.1 m,桩上设置 24 m 钢管混凝土柱作为竖向支撑。

## 2.2 工程地质条件

本工程地质条件比较复杂,为了便于建模计算,对土层进行简单的分类。根据地质勘察报告,将基坑开挖影响范围内的土大致分为 6 层,具体参数见表 1。

表 1 各土层的力学参数

土层	厚度/ m	$c$ / kPa	$\Phi$ / ( $^{\circ}$ )	$\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E$ / MPa	$\nu$
1	4	0	18	18.0	31.2	0.3
2	4	6.8	25	18.2	20.4	0.3
3	16	12	14.2	17.2	11.7	0.3
4	26	7.5	30	18.7	26.0	0.3
5	24	12.3	23.8	18.5	42.1	0.3
6	26	5.5	19.5	19.5	95.3	0.3

## 2.3 基坑开挖施工工况

工况 1:地下连续墙、桩基施工结束后,进行基坑土体加固施工及降水管井的施工,预降水 20 d。

工况 2:按 1:2 的坡度从北向南放坡开挖,自然地面至 B0 板支撑底,开挖深度 4.10 m。

工况 3:严格控制垫层标高,表面压光后铺设隔离层,垫层强度到 80% 后施工地下室首层结构板及临时封闭板,相关结构部位预留插筋,预留浇捣孔。

工况 4:待混凝土强度达到 100% 后,进行下层土的开挖,按 1:2 的坡度盆式开挖至 -12.350 标高,随挖随浇筑混凝土垫层。

工况 5:分块搭设排架浇筑地下室第一层顶板 B<sub>1</sub> 板、临时支撑和内衬墙。插筋预留,根据围护设计确认后预留相关专业洞口,焊接预埋件,预留浇捣孔。

工况 6:待混凝土强度达到 80% 后,进行下一层土方开挖,基坑周边在 -12.350 标高位置设置一级平台按 1:2 坡度放坡开挖至 -13.150 标高,随挖

随挖随浇筑垫层。

工况 7:混凝土垫层强度达到 80% 后,铺设隔离层,施工第一道临时支撑和内衬墙。插筋预留,预留浇捣孔。

工况 8:待混凝土强度达到 80% 后,进行下层土的开挖,基坑周边在 -15.250 标高位置设置一级平台按 1:2 的坡度盆式开挖至 -19.750 标高,随挖随浇筑混凝土垫层。

工况 9:分块搭设排架,施工地下二层结构梁板 B<sub>2</sub> 板及结构缺失处砼临时支撑,插筋预留,根据围护设计确认后预留相关专业洞口,焊接预埋件,预留浇捣孔。

工况 10:待混凝土强度达到 80% 后,进行下层土的开挖,基坑周边在 -19.750 标高位置设置一级平台按 1:2 的坡度盆式开挖至 -20.570 标高,随挖随浇筑混凝土垫层。

工况 11:混凝土垫层强度达到 80% 后,铺设隔离层,施工第二道临时支撑和内衬墙。插筋预留,预留浇捣孔。

工况 12:待混凝土强度达到 80% 后,进行下层土的开挖,按 1:2 的坡度盆式开挖至 -24.00 标高,随挖随浇筑混凝土垫层。

## 3 基坑开挖过程数值分析

### 3.1 建立模型

该地下变电站基坑属于对称模型,故取一半结构进行分析即可,并把问题简化为平面应变问题。根据前人对深基坑变形影响范围的研究成果,结合本工程实际情况,取模型尺寸为 120 m × 100 m (水平 × 竖直)。Plaxis 在划分网格时,有 15 和 6 节点单元可供选择。其中 15 节点单元网格比 6 节点单元网格更精细而且更灵活。本文采用较为精密的 15 节点单元来进行分析。

根据前人经验<sup>[8-12]</sup>,采用 Mohr - Coulomb 模型能较好的模拟基坑开挖过程的变形规律。本文土体本构模型为 Mohr - Coulomb 模型。建模过程中,采用板单元来模拟地下连续墙、桩和地下结构的楼板;用锚定杆单元来模拟临时支撑;用 Plaxis 的初始地应力生成功能平衡初始地应力,且在平衡初始地应力时激活地下连续墙和桩,以消除其对地基变形的影响。利用 Plaxis 建立模型如图 1。

操作步骤如下:激活土体、地下连续墙、桩和立柱,平衡初始地应力;分步开挖土体,并按工况逐一激活各层顶板和临时支撑;激活基坑底板,完成计算。

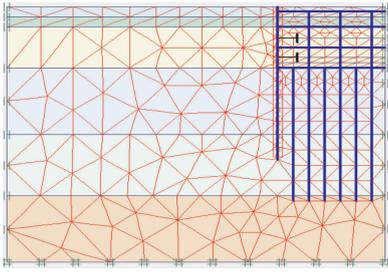


图1 Plaxis 创建的模型图

### 3.2 计算结果与实测数据比较

Plaxis 计算的各个工况下地下连续墙的变形和对应时期的工程实测数据分别如图 2、3 所示。其中图 2 中 4 条曲线分别代表各层顶板和基坑底板激活完成后支护结构的侧向变形。通过对比分析计算结果与工程实测数据,可以发现,Plaxis 计算得到的支护结构的侧移与实测数据具有较好的一致性。从图中可以看到,随着基坑开挖深度的加深,支护结构最大侧移量逐渐加大,发生最大侧移的点的位置也逐渐变深。基坑底板完成后,计算的地下连续墙最大侧移为 34.05 mm,最大侧移位置位于地下 20 m 深处;工程实测地下连续墙最大侧移为 30.38 mm,发生最大侧移的位置位于地下 18 m 深处,与计算结果相差不大。通过比较可以发现开挖上部土体时支护结构形变速率很大,而开挖下部土体时,其变形速率相对较小。

上述结果表明,Plaxis 在模拟深基坑逆作法施工过程的计算中,有较好的适用性,其模拟计算的结果可以对工程实际进行有效预测,也可以对深基坑逆作法施工的设计和方案进行指导。

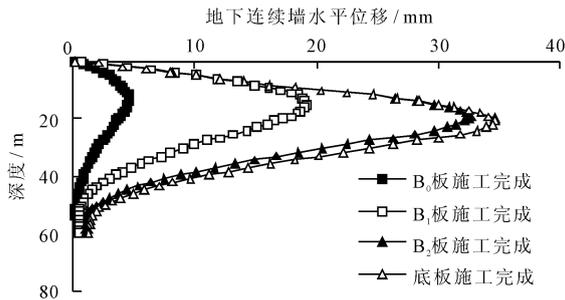


图2 数值计算地下连续墙的变形结果

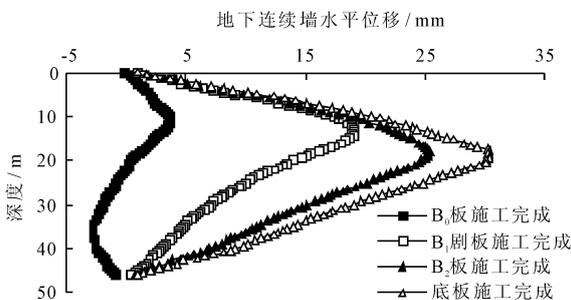


图3 地下连续墙实测变形

## 4 影响支护结构变形因素的探究

### 4.1 地下连续墙的插入比对变形的影响

地下连续墙的插入比是指墙体插入坑底以下部分的长度与基坑开挖深度的比值。以地下连续墙插入深度分别取 6、16、24、40 m (即插入比分别为 0.25、0.67、1.0、1.67) 为变量,用 Plaxis 建立一组模型。计算结果如图 4 所示。

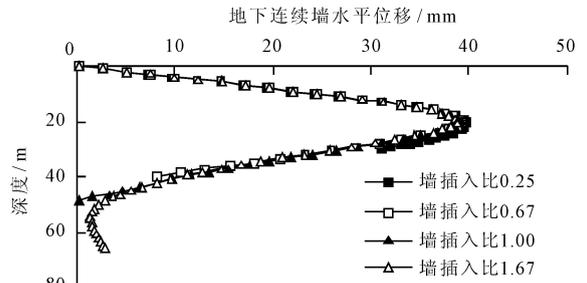


图4 不同插入比地下连续墙水平位移的计算结果

观察图 4 可知,在插入比分别为 0.25、0.67、1.0、1.67 时,支护结构最大位移分别对应于 39.7、38.9、38.3、38.1 mm。由此可见,逆作法施工时,地下连续墙的插入比对其侧向变形有一定影响,但影响很小。而且当插入比很小时(如 0.25),地下连续墙虽然墙脚处有较大位移,但是也没有出现明显的踢脚现象。这与程琪等<sup>[1]</sup>、徐中华等<sup>[13]</sup>等得到的当插入比很小时,地下连续墙底部会出现踢脚的结论不符。出现这种现象的原因可能是受逆作法施工的影响,具体原因不详。

### 4.2 桩的数量对变形的影响

曹力桥<sup>[14]</sup>通过有限元分析得出结论:在软土地区的深基坑开挖过程中,工程桩对坑底隆起变形有明显的约束作用。以基坑在横向设置灌注桩数量为变量,用 Plaxis 建立一组模型,在基坑横向设置灌注桩数量分别为 6、12、18 根。计算结果如图 5 所示。

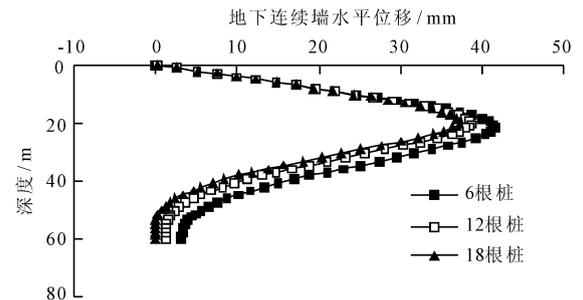


图5 不同桩数的地下连续墙变形计算结果

由图 5 可知,逆作法施工时,基坑内灌注桩的数量对支护结构侧移量有一定影响,但是对于最大位

移点的影响不大。在一定范围内,桩的数量越多,支护结构侧向变形越小。因此,在要求严格控制变形的工程中,可以通过适当增加桩的数量来控制变形。当桩的数量从6根增加到12根时,支护结构的位移从41.8 mm减小到38.7 mm;当桩的数量从12根增加到18根时,支护结构的位移从38.7 mm减小到37.4 mm。可见基坑内桩的数量越多,桩的数量对于支护结构的位移量影响越小。因此在桩的数量达到一定程度后,再增加桩的数量对于控制基坑变形意义不大。

### 4.3 临时支撑对变形的影响

逆作法与传统顺做法的重要区别之一就是逆作法施工过程中会用层板结构永久支撑代替顺做法中的临时支撑,但是很多逆作法施工的过程中也会适当设置临时支撑。用Plaxis建立一组两个模型,其中一个不设临时支撑,仅靠层板结构作为永久支撑,另一个模型如实例除用层板结构作为永久支撑外,还在地下二层和地下三层处设置两道临时支撑。计算结果如图6所示。

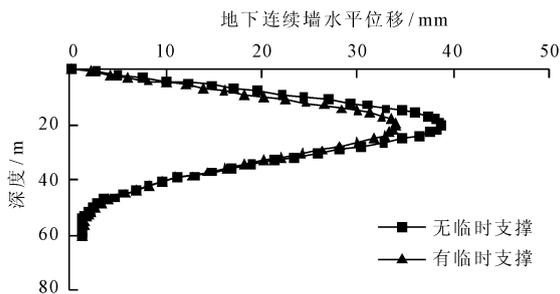


图6 有、无支撑的地下连续墙变形计算结果

由图6可知,当不设临时支撑时,地下连续墙最大侧移为38.9 mm,最大位移点在地下20 m处;当设置两道临时支撑时,地下连续墙最大侧移减小到34.1 mm,最大位移点在地下21 m处。可见,在逆作法施工过程中,设置临时支撑对支护结构的侧向变形有一定的约束作用,而且对最大变形位置也有一定影响。因此,在要求严格控制变形的逆作法施工过程中,可以在间距较大的层板结构之间适当设置临时支撑以控制支护结构的变形。

## 5 结论

(1)采用Plaxis的摩尔库伦模型模拟超深基坑的逆作法施工过程是可行的,其计算值与工程实测值基本一致,变形趋势也基本相同。开挖上部土体时支护结构形变速率很大,而开挖下部土体时,其变形速率相对较小。

(2)当地下连续墙插入比使其不会产生踢脚现象时,其插入比对其变形的影响不大。因此,对于墙底已经插入硬土层的深基坑,通过增大地下连续墙插入比来控制变形的做法是不合理的。

(3)超深基坑的逆作法施工中,当桩的数量较少时,适当增加桩的数量可以有效控制变形,但是其效果会随着桩的数量的增加而逐渐降低。

(4)在超深基坑的逆作法施工过程中,在间距较大的层板结构之间适当设置临时支撑可以有效控制支护结构的变形。

### 参考文献:

- [1] 程琪,刘国彬,张伟立. 上海地区地铁超深基坑及深基坑变形有限元分析[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(S2):1497-1502.
- [2] 江晓峰,刘国彬,张伟立,等. 基于实测数据的上海地区超深基坑变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(S2):570-573.
- [3] 张晋勋,廖秋林. 深基坑逆作法施工技术应用现状与展望[J]. 施工技术,2014,43(7):1-4+25.
- [4] 刘红军,高艳,谭长伟. “土岩”二元地区基坑逆作法跃层式开挖数值模拟[J]. 工程地质学报,2010,18(S1):190-194.
- [5] 张忠,李维滨,沈炜. 基于ABAQUS的超高层建筑逆作法施工控制研究[J]. 施工技术,2014,43(19):9-12+16.
- [6] 王瑞琪,杜春涛. 逆作基坑地下连续墙水平变形数值分析[J]. 低温建筑技术,2013(7):121-124.
- [7] 芮瑞,夏元友. 基于三维有限元的地下连续墙深基坑逆作法施工方案设计[J]. 岩土力学,2008,29(5):1391-1395.
- [8] 崔宏环,张立群,赵国景. 深基坑开挖中双排桩支护的的三维有限元模拟[J]. 岩土力学,2006,27(4):662-666.
- [9] 巢斯,王磊,雷小虎,等. 上海软土地区深基坑回弹引起桩拉力的探讨[J]. 结构工程师,2009,25(5):88-92.
- [10] 王国粹,梁志荣,魏详,等. 上海中山医院基坑逆作法施工时间效应分析[J]. 岩土力学,2014,35(S2):495-500.
- [11] 胡康俊,丰土根,张福海,等. 深基坑开挖坑底隆起影响因素有限元分析[J]. 施工技术,2014,43(22):116-119.
- [12] 李松,杨小平,刘庭金,等. 特大圆环支撑深基坑变形特性的三维数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(1):84-89.
- [13] 徐中华,王建华,王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报,2008,41(8):81-86.
- [14] 曹力桥. 软土地区深基坑开挖坑底隆起的有限元分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2):819-824.