第28卷第3期　　水资源与水工程学报　　Vol. 28 No. 3
2017年 6月　　Journal of Water Resources & Water Engineering　　Jun. ,2017

DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2017. 03. 39

不同开挖方式对软土区深基坑连续墙变形的影响分析

孟伟波，郑钰涛，陈有亮
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘　要：以上海地区某地下变电站深基坑工程为背景，根据工程实测数据分析基坑开挖对支护结构变形的影响规律。结果表明：基坑开挖过程中，连续墙的位移呈抛物线形，且位移值随着开挖深度增加而增加，但最大水平位移的位置始终保持在开挖面附近；基坑支护结构的变形受到明显的坑角效应影响。采用有限元软件 Plaxis 分别对该工程顺作法和逆作法施工过程进行数值模拟，通过分析比较得出不同施工方案对基坑变形的影响规律。将数值模拟结果与实测数据对比，分析逆作法施工方案的可行性与优势。

关键词：深基坑开挖；顺作法；逆作法；基坑变形；数值模拟

中图分类号：TV551.4；TU753　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2017)03-0216-05

Influence of different excavation methods on the deformation of deep foundation pit in soft soil area

MENG Weibo, ZHENG Yutao, CHEN Youliang
(*School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai* 200093, *China*)

Abstract: Based on the engineering data of an underground substation in Shanghai, the influence of excavation on the deformation of supporting structure was analyzed according to the measured data. The results show that the displacement of the continuous wall is parabolic during the excavation of the foundation pit, and the displacement value increased with the increase of excavation depth; however, the maximum horizontal displacement position remained near the excavation surface. The deformation of foundation pit structure was affected obviously by the corner effect. The finite element software Plaxis was used to simulate the construction process of the project, and the influence of different construction schemes on the deformation of the foundation pit was analyzed and compared. By validating the numerical simulation results with the measured data, the feasibility and advantages of the reverse construction method were demonstrated.

Key words: deep excavation; top-down method; reverse construction method; deformation of foundation pit; numerical simulation

1　研究背景

深基坑工程有明显的环境效应，基坑开挖引起的土体卸荷会导致支护结构的受力和变形，变形过大会影响施工甚至导致工程事故[1]。

现阶段基坑工程的施工方案按照其开挖顺序可分为顺作法和逆作法。顺作法施工存在设计、施工经验上的优势，但是顺作法的弊端也十分明显：(1)先开挖后搭建，施工工期较长；(2)采用大量的临时支撑，不仅需用大量钢材，也增加了地下结构施工难度；(3)临时支撑的刚度较小，导致基坑变形较大，且临时支撑被拆除时，可能引起二次受力和变形。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[2]。逆作法的施工方法以其施工周期短、支护费用低、对周边环境影响小的优势在国内得到迅

收稿日期：2017-02-28；　**修回日期**：2017-03-19
基金项目：上海市自然科学基金项目(14ZR1428200)
作者简介：孟伟波(1993-)，男，安徽蚌埠人，在读硕士研究生，研究方向为桥梁与隧道工程。

速发展。之前已经有不少学者对逆作法施工的基坑变形特性进行了分析[3-11],并得到一些指导性结论。如翟文信[3]通过分析上海中心大厦的工程实测数据,对逆作法施工全生命周期支护体系的安全状态进行评价;王国粹等[4]、谢贻军等[5]、王瑞琪等[6]通过数值模拟和工程实例结合的方法分析了逆作法施工对支护结构变形的影响规律。

本文先通过现场监测实测数据分析基坑开挖对支护结构变形的影响,再用 Plaxis 软件分别对该工程顺作法和逆作法施工过程进行数值模拟,对模拟结果进行比较分析,得出不同施工方案对基坑变形的影响规律。

2　工程概况

本文工程来自上海市某地下变电站工程,建筑物为地下 3 层、地上 5 层(局部 4 层)布置,基坑平面形状布置为 L 型,基坑面积 4 569 m^2,基坑开挖深度 22.0 m,总建筑面积 25 963 m^2(地下 13 816 m^2,地上 12 147 m^2)。基坑围护墙采用地下连续墙结构,支撑系统采用钢筋混凝土支撑及围檩。总共设置了 5 道支撑及围檩。

该深基坑采用地下连续墙结构作为围护结构,内部支撑为钢筋混凝土支撑。地下连续墙厚 1 200 mm,墙深 53 m,插入⑦$_2$ 粉砂层 16.5 m,采用 C35 混凝土浇筑。地下墙墙趾进行注浆加固,每幅地下墙放置 2 个注浆管。

2.1　工程地质条件

根据岩土工程勘察报告,本场地地貌属于滨海平原地貌类型,地面标高在 3.00 ~ 4.42 m 之间,高差 1.42 m。原有厂区道路标高约为 3.43 m。场地内部土体最大勘察深度是 91.29 m,在这一深度范围内的地基土的物理力学参数见表 1。

表 1　场地内土层参数

层 号	土层名称	层厚/m	层底标高/m	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ
①	杂填土	2.00 ~ 3.50	1.48 ~ 0.00		
②	粉质黏土	0.40 ~ 1.80	0.32 ~ -0.58	16.0	18.5
③	淤泥质粉质粘土夹黏质粉土	6.10 ~ 7.40	-6.62 ~ -7.10	10.0	21.0
④	淤泥质黏土	7.30 ~ 8.00	-14.24 ~ -14.70	12.0	11.5
⑤	粉质黏土	5.60 ~ 6.40	-20.30 ~ -20.90	19.0	17.0
⑥	粉质黏土	3.90 ~ 4.70	-24.60 ~ -25.08	51.0	15.0
⑦$_1$	砂质粉土	7.40 ~ 8.80	-32.41 ~ -33.78	8.00	28.5
⑦$_2$	粉砂	31.80 ~ 33.60	-64.64 ~ -66.58	4.00	32.5
⑨$_1$	砂质粉土	12.00 ~ 15.00	-78.50 ~ -80.21	14.0	25.5
⑨$_2$	粉砂				

2.2　现场监测方案与施工工况

本工程在基坑周围设置了 18 个监测点,编号为 CX1 ~ CX18,如图 1 所示。

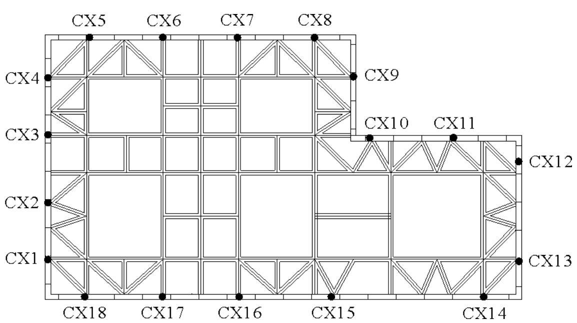


图 1　连续墙测斜监测点位图

本工程坑内土体分 5 步开挖,每开挖完成一个土层后设置一道支撑,全部土体开挖完成后,浇筑底板。施工工况如表 2 所示。

表 2　施工工况

土层层序	层底标高/m	分层厚度/m	分层土方量/m^3
第 1 层土	-5.700	4.8	23856
第 2 层土	-9.700	4.0	19880
第 3 层土	-13.700	4.0	19880
第 4 层土	-18.000	4.3	21371
第 5 层土	-22.000	4.0	19880

3　监测结果及分析

本文选取了 6 个测斜点的数据进行分析,各个测斜点在不同工况下的变形情况如图 2 所示。图 2 中二撑为第二道支撑完成后的位移;底板表示建筑物底板施工完成后的位移;顶板表示顶板施工完成后的位移。

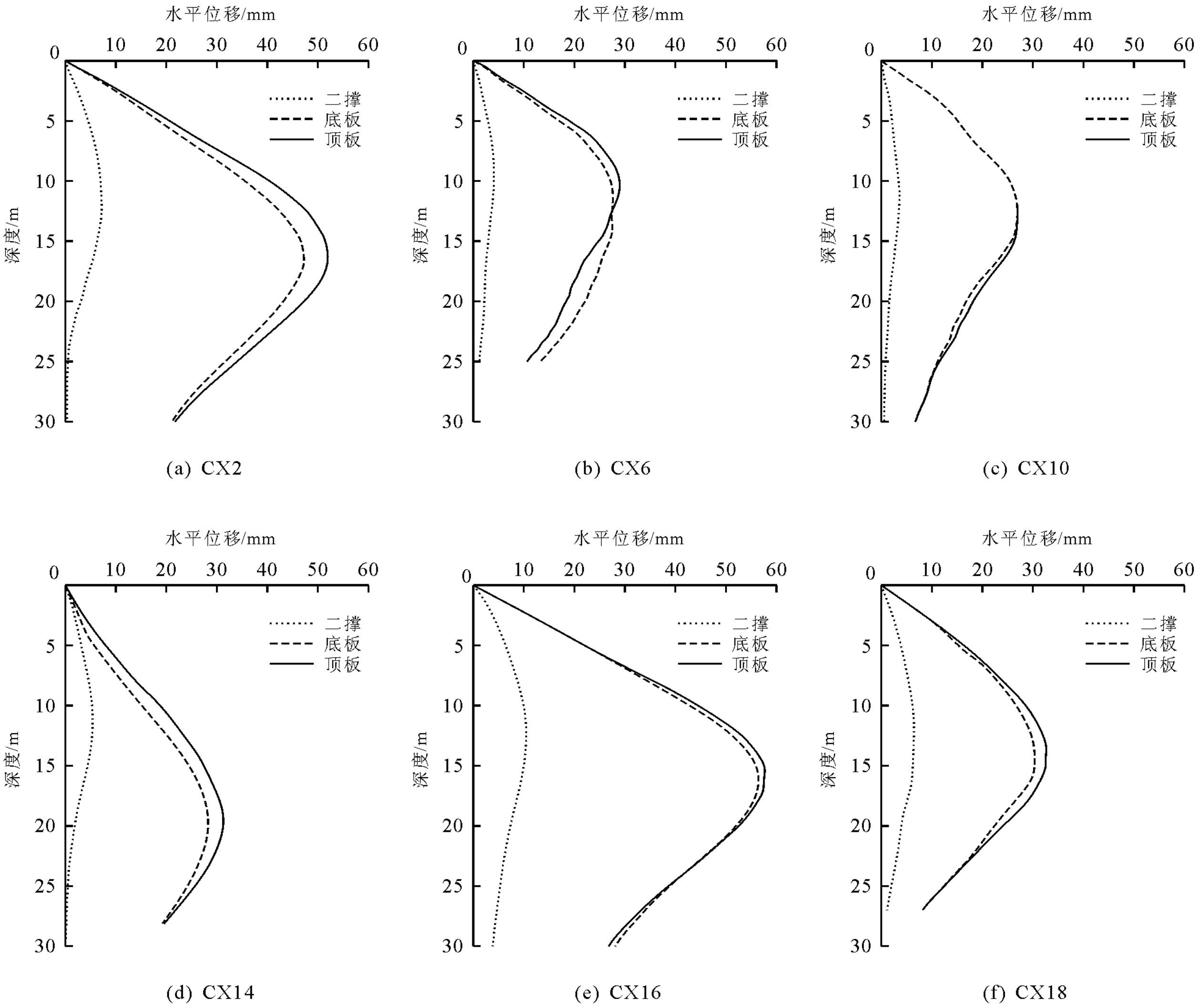


图 2 连续墙水平位移

从图 2 可以看出,各监测点测得的墙体位移变化规律与施工工况有关,且变化规律基本相同:

(1)开挖阶段,各连续墙变形曲线均呈向基坑内侧位移趋势,位移曲线呈抛物线形,基坑开挖深度越大,相应的变形越大。这与王晓锋等[12]的研究结果相同;

(2)连续墙最大水平位移的位置随着开挖深度的增大而逐渐下移,并始终保持在开挖面附近。这与王卫东等[13]、徐中华等[14]的研究结果相近;

(3)连续墙最大变形处出现在开挖面靠上的位置。开挖完成后,大部分监测点的最大值出现在地下 17m 的位置,而不像绝大多数深基坑工程那样出现在基坑底部。这可能是由于本工程基坑对基坑底部采用了双重管高压旋喷桩裙边的加固措施。

(4)大底板浇筑完成至地下结构封顶阶段,各监测点变形的变化速率明显减小,说明深基坑工程中发生的位移主要出现在基坑开挖过程中;而后期出现的少量变形主要是在拆除临时支撑后、内部结构尚未达到设计强度这一阶段出现的,这种位移在逆作法施工的深基坑工程中是可以避免的。

(5)不同监测点之间的变形存在一些差异:测点 CX16 的侧移明显大于同一条边其他测点的变形,而整个基坑位移最小值出现在 CX10 处。这是由于 CX16 位于基坑中部,远离基坑的边角,而 CX10 位于基坑的阴角处,可以看出基坑变形受到明显的坑角效应影响;在基坑开挖过程中连续墙变形呈现中间位移变化大,两端位移变化较小的趋势,并且不同深度处所受坑角效应的影响也存在差异,在最大位移深度附近所受坑角效应影响较为明显,在位移较小处所受坑角效应影响较小,这与刘安宁[15]、王芳等[16]研究结果一致。

4 顺作法和逆作法施工方案的数值模拟

本文采用 Plaxis 软件对工程进行二维有限元模

拟，计算模型选取的截面为深基坑测斜监测点 CX16 所在的截面。

4.1　模型建立

模型深度方向取值为 80 m；所选截面基坑开挖宽度为 54 m，模型取其一半，整个模型的宽度为 120 m。逆作法模型当中的各层楼板是根据相似项目虹杨变电站深基坑工程当中各层板参数建立模型，用软件当中板单元来模拟；顺作法模型则是根据实际工程中临时支撑的参数设定并通过锚杆来模拟。

模型边界条件：模型左、右边界水平方向位移假定为零，上边界竖直方向不限制位移；下边界完全固定。计算模型如图 3 所示。

4.2　施工过程模拟

模拟各施工步骤时均按照实际工期设定各施工步骤的时间顺序，开挖模拟具体工况见表 3：

4.3　两种施工方案计算结果对比分析

两种施工方案模型计算结果如图 4，由图 4 可以看出，在两个模型的计算结果中，连续墙变形的规律相同：

(1) 在两种模型的计算结果中，地下连续墙变形形态均为抛物线型；

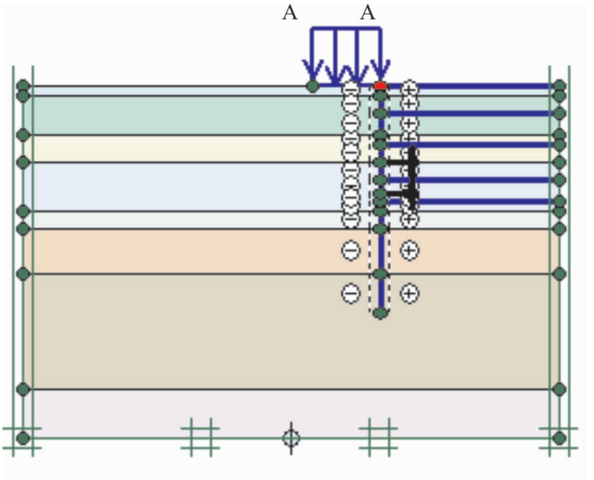
(2) 随着开挖的进行，连续墙位移逐渐增大，增大的速率稳定，连续墙最大值出现的位置不断下移。

(3) 逆作法水平位移模型计算结果始终小于顺作法模型计算结果，且逆作法模型计算结果中连续墙最大位移出现位置相比于顺作法模型靠下；

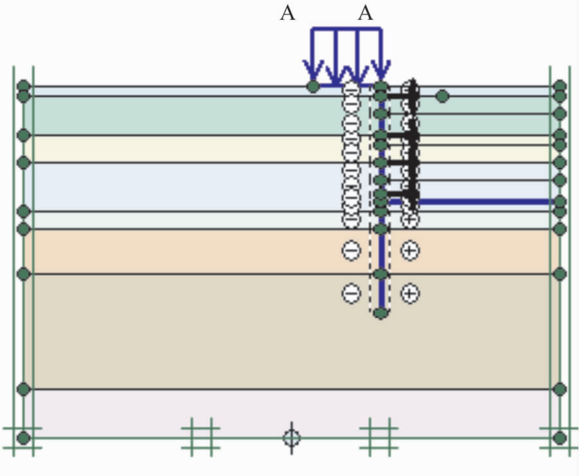
(4) 两种模型计算结果在开挖初期阶段相差不大，随着开挖的进行，其差异逐渐增大，反映出逆作法施工方案在连续墙位移控制方面的优势会随着开挖的进行逐渐增大。

4.4　模拟结果与实测数据对比

将模拟两种施工方案得到的连续墙最终侧移值和实际监测值置于同一图中，如图 5 所示。

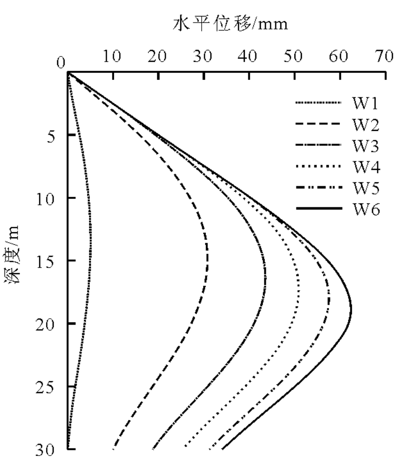


(a) 逆作法

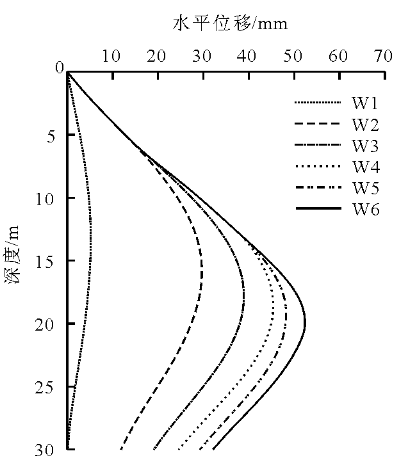


(b) 顺作法

图 3　计算模型



(a) 顺做法



(b) 逆做法

图 4　连续墙位移变化趋势

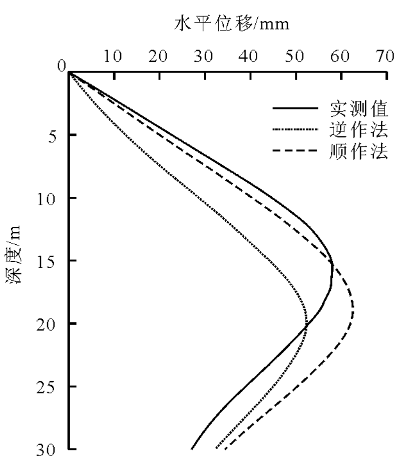


图 5　最终计算结果与实测结果

表 3 开挖模拟工况

工况	顺作法	逆作法
1	激活地下连续墙和地表荷载	激活地下连续墙和地表荷载
2	通过冻结土体模块模拟开挖第 1 层土	通过冻结土体模块模拟开挖第 1 层土
3	第 1 道支撑	激活地下室顶板
4	开挖第 2 层土;降水	开挖第 2 层土;降水
5	激活第 2 道支撑	激活 B1 板
6	开挖第 3 层土;降水	开挖第 3 层土;降水
7	激活第 3 道支撑	激活第 1 道临时支撑
8	开挖第 4 层土;降水	开挖第 4 层土;降水
9	激活第 4 道支撑	激活 B2 板
10	开挖第 5 层土;降水	开挖第 5 层土;降水
11	激活第 5 道支撑	激活第 2 道临时支撑
12	开挖底层土;降水至开挖面以下	开挖底层土;降水至开挖面以下
13	激活底板	激活底板

从图 5 可以发现,两种计算模型所得到的变形曲线形状同实测值一致,说明除施工方案外的其他参数选择较为合理。

两种计算模型中连续墙最大值出现的位置均比实际值靠下,但根据多年来上海软土地区基坑工程的经验,计算值具有一定的合理性,对于这样的差异,可以认为是数值模拟当中理想化假设并未能够充分模拟复杂的现场情况和地质情况,对此可做进一步研究。

运用顺作法施工方案的模型计算值比实际值偏大,运用逆作法方案的模型计算值比实际监测值小,考虑到计算模型在模拟当中计算结果偏于保守的情况,可以认为改用逆作法后地下连续墙位移有了较大幅度的减小。

5 结 论

本文通过实测数据分析,得到上海地区某顺作法施工深基坑工程开挖过程中地下连续墙的变形规律。采用 Plaxis 软件分别对该工程顺作法和逆作法施工过程进行数值模拟,对模拟结果进行比较分析,得到以下结论:

(1)开挖阶段,各连续墙变形曲线均呈向基坑内侧位移趋势,位移曲线呈抛物线形,基坑开挖深度越大,相应的变形越大;

(2)连续墙最大变形位置随着开挖深度增大而逐渐下移,但始终保持在开挖面附近;

(3)逆作法施工与顺作法相比地下连续墙的变形量更小,最大位移出现位置更深;

(4)逆作法施工方案在连续墙位移控制方面的优势会随着开挖的进行逐渐增大。

(5)基坑变形受到明显的坑角效应影响。在基坑开挖过程中连续墙变形呈现中间位移变化大,两端位移变化较小的趋势,并且不同深度处所受坑角效应的影响也存在差异。

参考文献:

[1] 冯晓腊,熊宗海,莫 云,等.复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):330-336.

[2] 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):1-5.

[3] 翟文信.上海中心大厦裙房基坑逆作法支护体系实测分析[J]. 施工技术,2012,41(18):31-34.

[4] 王国粹,梁志荣,魏 详.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.

[5] 谢贻军,钱德玲,魏雪云.紧邻地铁站的超大深基坑逆作法变形规律研究[J]. 合肥工业大学学报,2014,37(10):1231-1238.

[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, 35(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] 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):9-16.

[9] 朱锦峰.某大型深基坑逆作法施工技术[J]. 施工技术,2013, 42(1):65-70.

[10] 荆少东.土岩二元地层逆作法施工基坑变形数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2013, 9(6):1310-1315.

[11] 杨利剑,符菊花,周军伟.某内支撑结合逆作法基坑施工位移监测应用[J]. 施工技术,2015,44(S1):116-119.

[12] 王晓锋,陈有亮,孟伟波,等.上海某超深基坑逆作法施工变形有限元分析[J]. 水资源与水工程学报. 2016,27(3):192-195.

[13] 王卫东,徐中华,王建华.上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报. 2011,33(11):1659-1665.

[14] 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.

[15] 刘安宁.黄土地区深基坑坑角效应研究[D]. 西安:长安大学,2015.

[16] 王 芳,郭红仙.带阳角基坑空间效应的三维数值分析[J]. 铁道建筑,2006,(12): 69-72.