

# SMW工法+环形支撑体系在基坑支护中应用研究\*

Application Research of SMW Method & Ring Support System in Foundation Pit Support

崔泽海, 樊鹏鹏, 胡发旺, 李新强, 栾蔚

(中国建筑第八工程局有限公司, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** SMW工法桩与环形支撑的联合支护体系逐渐在基坑工程中实际应用, 分析其支护效果和支护桩的受力性能对工程实际具有重要意义。基于某基坑工程实际, 运用有限差分程序建立数值模型, 分析其降水及多次开挖工况下土体的位移和支护桩的变形特征。研究表明: 降水工况下, 基坑的土体沉降主要集中在开挖范围内及基坑的边缘处, 随着开挖的进行, 基坑边缘土体沉降线呈圆弧状, 坑底土体因卸荷会产生回弹, 最大回弹值约为4.5 mm; 基坑开挖对距边缘25 m范围内的土体影响较大, 从地表至地下6.5 m影响逐渐减小; 基坑侧壁的变形随开挖加深而增大, 呈现出先增大后减小的趋势, 支护桩在坑边中心位置变形最大, 承受较多的荷载, 且对于环形内支撑体系, 整体受力均匀, 研究结果可为基坑支护工程提供参考。

**关键词:** SMW工法桩; 环形支撑; 基坑支护; 数值模拟

**中图分类号:** TU 753      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8249 (2023) 06-0008-09

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.002

CUI Zehai, FAN Pengpeng, HU Fawang, LI Xinqiang, LUAN Wei

(China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** The combined supporting system of SMW pile and ring support is gradually applied in foundation pit engineering. It is of great significance to analyze the supporting effect and the mechanical performance of the supporting pile for engineering practice. Based on the engineering practice of a foundation pit, the finite difference program is used to establish a numerical model to analyze the displacement of soil and the deformation characteristics of supporting piles under dewatering and multiple excavation conditions. The results show that: Under the condition of dewatering, the soil settlement of the foundation pit is mainly concentrated in the excavation range and the edge of the foundation pit. With the excavation, the settlement line of the soil at the edge of the foundation pit is circular. The soil at the bottom of the pit will rebound due to unloading, and the maximum rebound value is about 4.5 mm. The excavation of foundation pit has a great influence on the soil within 25 m from the edge, and the influence gradually decreases from the surface to the underground 6.5 m. The deformation of the side wall of the foundation pit increases with the deepening of excavation, showing a trend of increasing first and then decreasing. The deformation of the supporting pile at the center of the pit is the largest, and it bears more loads. For the annular internal support system, the overall stress is uniform. The research results can provide reference for foundation pit support engineering.

**Keywords:** SMW piles; ring support; foundation pit; numerical simulation

\* 基金项目: 中建八局科技研发项目: 高原高寒地区大型会展中心综合建造技术。

作者简介: 崔泽海 (1990—), 男, 高级工程师, 主要从事建筑施工方面的研究。

通讯作者: 栾蔚 (1987—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事结构基础施工方面的研究。

收稿日期: 2023-05-26

## 0 引言

随着城市地下空间的不断开发利用, 基坑开挖技术也随之迅速发展, 越来越多的规模大、基础深、环境复杂的基坑工程被建设。基坑开挖施工过程中, 会打破原有的土体结构平衡, 对周围的基础进行扰动, 导致变形或塌陷, 近年来因基坑开挖不当引起的工程事故频发。为了保证开挖时基坑自身及周边环境的稳定, 采用合适的支护结构和围护体系十分重要。

当前, 基坑支护有着多种形式, 常见的有排桩支护<sup>[1]</sup>、地下连续墙支护<sup>[2]</sup>、锚杆支护<sup>[3]</sup>和挡墙+支撑<sup>[4]</sup>等多种组合支护形式, SWM 工法桩+内支撑<sup>[5]</sup>是近年来兴起并被广泛应用的新支护形式, SMW 工法桩是在三轴水泥土搅拌桩内插入 H 型钢, 形成的复合围挡结构, 具有挡土、止水、强度高等特点。王占生<sup>[6]</sup>研究了 SMW 工法桩在施工期间对盾构隧道的影响, 彭国东<sup>[7]</sup>阐述了 SMW 工法桩的支护结构体系在实际工程中的应用, 表明其具有一定优势。

SMW 工法桩既可以单独使用, 也可与内支撑或锚杆等共同进行支护, 伍丽珍<sup>[8]</sup>研究了钢绞线预应力锚索与 SMW 工法桩联合在黄土地区中基坑支护, 证明了该支护形式的优越性。内支撑支护具有刚度大、控制基坑变形能力强、且利于施工等特点, 包含正交撑、角撑、圆环撑<sup>[9]</sup>等支护形式。曾运平<sup>[10]</sup>介绍了角撑体系在中国尊的超大型基坑土方开挖中的应用, 贺振昭<sup>[11]</sup>利用有限元程序模拟分析了不同内支撑数量对深基坑支护结构的影响。而圆环支撑<sup>[12]</sup>是将支撑结构设置成圆环

型结构, 这样土体侧压力通过围护墙传递给内支撑, 从而集中传递至圆环, 受力的性能较好, 适用于较大面积的基坑工程, 也是众多学者的重要研究对象。王春艳<sup>[13]</sup>对圆环支撑体系水平刚度系数的计算进行了解析式的推导, 提出了圆环支撑体系水平刚度系数的简易计算方法; 龚昕<sup>[14]</sup>论述了双圆环形支撑在基坑工程中的布置原则, 分析了其受力合理性及工程适用性。以上学者多从理论层面进行了研究, 并未有结合具体工程建立模型而进行的数值模拟<sup>[15-16]</sup>, 且无法直观展示应力规律。

本文基于有限差分程序 FLAC 3D<sup>[17]</sup>, 依托某工厂基坑工程的实际案例, 建立有限元数值模型, 分析了 SMW 工法桩与内环型支撑体系的联合作用效果, 及基坑开挖过程中的土体变形和支护桩的受力特征分析, 不仅一定程度上证实了理论, 更可为实际工程提供一定的参考价值。

## 1 工程概况及数值模型构建

### 1.1 地质概况及模型

基于某厂房一期深基坑工程, 选取 1 号基坑的局部作为研究对象, 根据现场勘测的地质资料, 各土层的参数如表 1 所示。图 1 为建立的相应数值模型。模型横向长度 211.5 m, 纵向 208 m, 高度为 50 m。基坑平面尺寸为 111.5 × 108 m, 开挖最大深度为 6.45 m。顶部为 1m 的 1:1 放坡, 共划分 9 个地层。在模型中考虑基坑边缘放坡, SMW 工法桩支护, 环形内支撑体系, 考虑联合支护作用下的基坑降水和开挖导致的土体沉降和支护体系的变形特征。

表 1 各土层物理力学性质指标

Table 1 Indexes of physical and mechanical properties of each soil layer

土层名称	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	含水率 $w$ (%)	弹性模量 $E$ (MPa)	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c$ (kPa)	摩擦角 $\phi$ (°)	土层厚度 (m)
素填土	18.0	22.7	3.6	0.35	12	5	0.8
塘填土	18.8	28.1	4.52	0.35	13	18	1.2
粉质黏土	16.6	53.6	2.22	0.35	5.60	7.70	1.5
淤泥质粉质黏土	19.1	27.7	6.08	0.35	13.7	25.7	1.6
粉质黏土	17.7	39.0	3.75	0.35	4.8	8.4	2.3
粉土夹粉质黏土	19.5	24.6	7.66	0.35	19.0	41.2	2.3
粉土夹粉砂	18.9	29.8	6.80	0.35	19.7	11.8	2.9
粉质黏土	19.0	29.1	9.42	0.35	25	8.2	2.2
粉质黏土	18.6	31.9	4.58	0.35	12.8	19.7	-

岩土力学

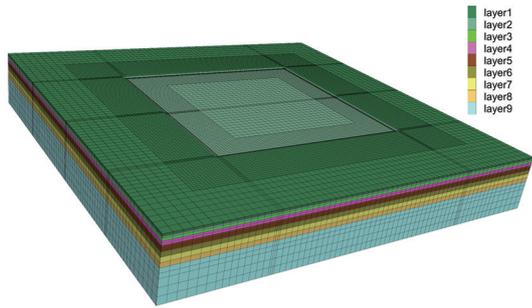


图1 网格划分后的分层模型

Fig. 1 The hierarchical model after meshing

1.2 围护结构及支撑

采用三轴深层搅拌桩内插 H 型钢的 SMW 法作为基坑开挖的围护结构，内插 H700×300×13×24 型钢，顶部冠梁将工法桩连接成整体，环形内支撑内撑交接处设置立柱，材料参数如表 2 所示。

支撑平面布置见图 2，采用 1 道钢筋混凝土环形支撑，周边辅以联系撑，环形支撑直径 97 m，立柱结构采用组合钢格构柱 4∠140 mm×14 mm，断面为 450 mm×450 mm，围护桩采用 p800 mm 钻孔灌注桩，桩长 24 m，建立了如图 3 所示的支护模型。

表 2 支撑体系参数

Table 2 The parameters of support system

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	极惯性矩 J/m <sup>4</sup>	惯性矩 I <sub>y</sub> /m <sup>4</sup>	惯性矩 I <sub>z</sub> /m <sup>4</sup>
内撑	2.06e11	0.25	0.0669	0.022	2.2×10 <sup>-5</sup>
立柱	2.06e11	0.25	0.0669	0.022	2.2×10 <sup>-5</sup>
工字钢	206	0.25	0.193	0.0108	2.2×10 <sup>-5</sup>
砼搅拌桩	30	0.2	/	/	/

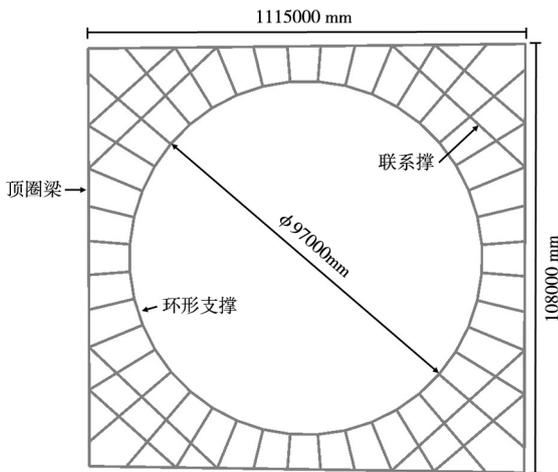


图 2 人员危险行为监控示意图

Fig. 2 Plane of enclosure and support system

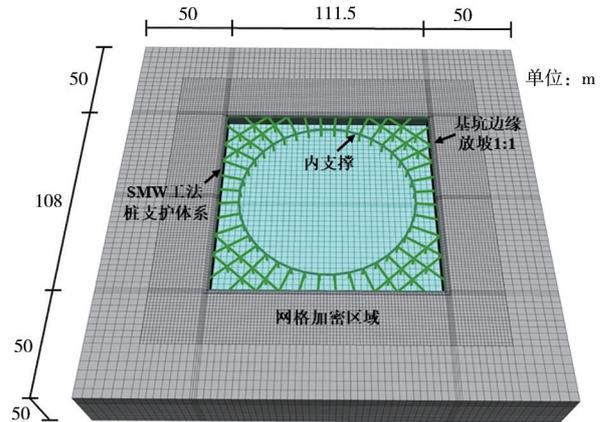


图 3 围护及支撑体系模型建立

Fig. 3 Establishment of enclosure and support system model

2 基坑开挖过程分析

基坑开挖共分为四层，第一层开挖 0.9 m，第二层开挖 1.9 m，第三层开挖 1.9 m，第四层开挖 1.55 m，在第一层开挖后，开始进支撑结构的施加。

2.1 基坑降水

模拟基坑开挖作用之前，首先要将基坑模型在降水之后求解至平衡，之后要将降水后的位移清除，进一步求解开挖工况，因为初始的地下场地水位偏高，开挖之前要进行降水，以便于基坑的顺利开挖，FLAC 3D 模拟降水作用，一般按照浮重度建立模型，之后在土体自重下达到平衡。

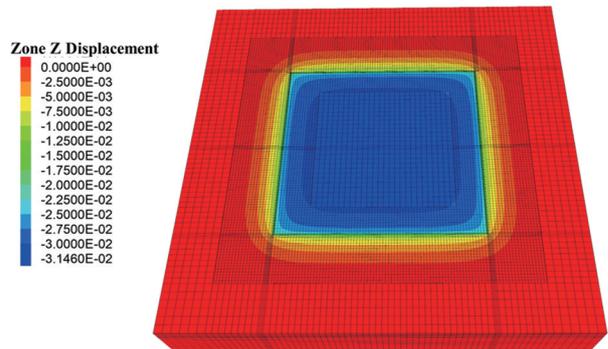


图 4 降水后基坑整体沉降

Fig. 4 The overall settlement after foundation pit dewatering

降水后整体位移结果如图 4 所示，图 5 为横向往基坑中心处半截面示意图。由于基坑降水后水位下降，土体含水率下降，可见土体出现一定的沉降，更多集中在基坑内部和边缘范围，外部影响

不大，中心处达到最大的沉降约为 3.14 cm，边缘处沉降较小，大都为 1 cm 左右，由内部向外部沉

降逐渐减小，边缘 25 m 外的土体沉降值基本为 0。

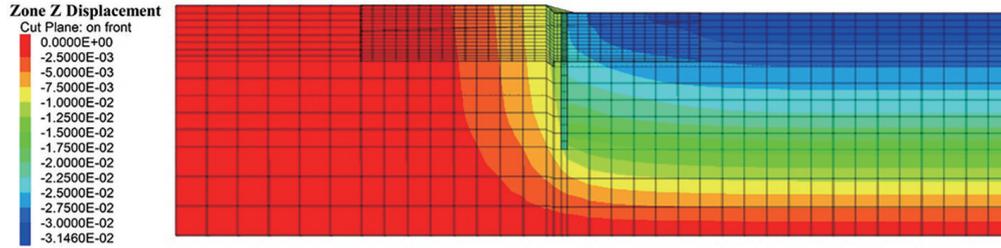


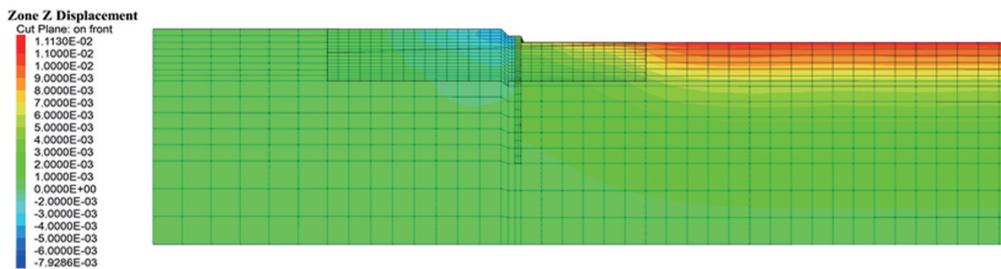
图 5 横向中心截面基坑沉降  
Fig. 5 The settlement of foundation pit with transverse central section

### 2.2 基坑底部土体隆起分析

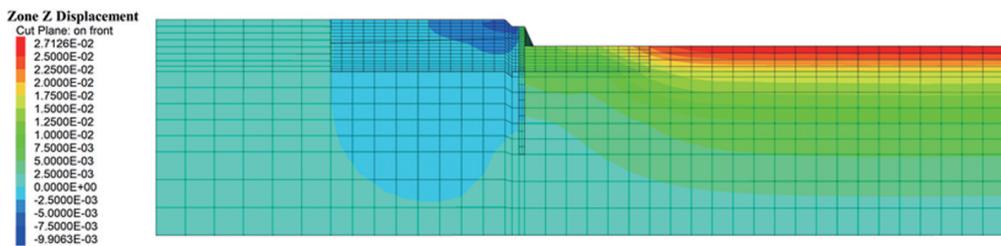
随着开挖的进行，对于基坑内的土体来说，相当于一个卸荷的过程<sup>[18]</sup>，开挖深度越深，内部土层的应力状态改变越多，土体应力释放越大，基坑内外压力差增大，坑底土体的回弹值也会越大，这里对建立的三维模型进行分步开挖，同时对基坑内的土体位移进行分析，这里以纵向中心处的一半横截面进行分析，结果如图 6 所示。

第一层土体开挖后，基坑边缘处土体发生轻微沉降，最大值约为 7.9 mm，且沉降的轮廓线为圆弧状，而基坑底部土体发生回弹，最大值出现在基坑的中心处，约为 11 mm，并由中心向边缘位置减小。边缘处因为有支护桩的作用，使土体沉

降位移较小，表明了支护桩的作用，开挖结束后进行内支撑支护。第二层土体开挖后，坑底土体回弹值增大，最大回弹值约为 27 mm，同样是位于基坑中心位置，基坑边缘处土体的沉降值约为 5 mm，土体沉降的弧形分界更加明显。第三层土体开挖后，对围护桩产生影响，桩顶发生大约为 2 mm 沉降，基坑底部的土体位移回弹值再一次增大，在基坑中心位置的回弹值达到 44 mm，基坑边缘处沉降约为 6 mm，第四层土体开挖后，基坑底部中心位置处最大回弹达到 45 mm，与第三次开挖相比相差不大，但在基坑边缘处的土体沉降已达到 9 mm，基坑深处的大部分土体位移基本为零，说明逐渐趋于稳定。

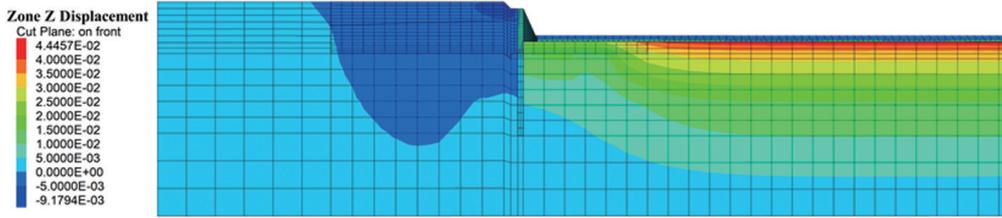


(a) 第一层开挖

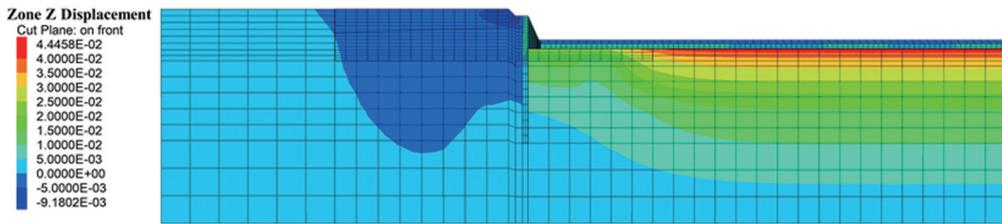


(b) 第二层开挖

岩土力学



(c) 第三层开挖



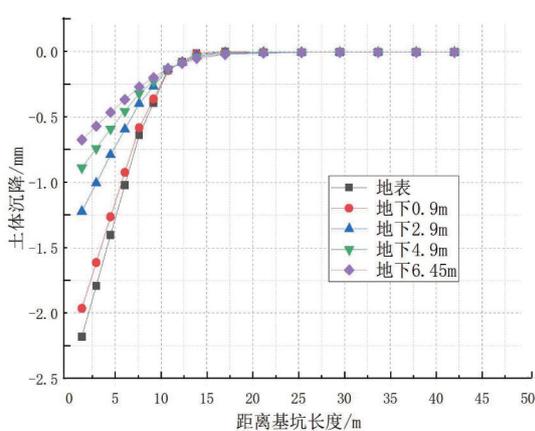
(d) 第四层开挖

图 6 分层开挖坑底土体回弹  
Fig. 6 The rebound of bottom soil under layered excavation

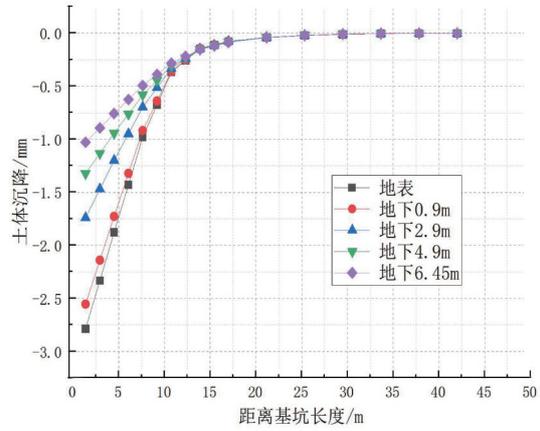
2.3 基坑周围土体沉降分析

为研究基坑开挖对周边地表沉降的影响，取基坑横向中心截面，距离基坑边缘左侧 50 m 的地表沉降值进行监测与分析，四次开挖后的监测结果如图 7 所示。四次开挖的结果具有一定的共同特征，距离基坑边缘 25 m 之外的地表基本未受到开挖影响而发生较大沉降，同时沉降最大位移均发生在地表位置，土体埋深越大则影响越小，改变关系基本为线性。第一层土体开挖后，地表处出现最大沉降约为 2.2 mm，位置为靠近基坑边缘

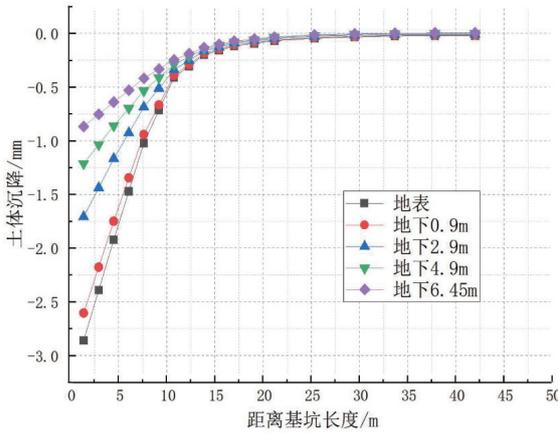
处，第二层土体开挖后，最大沉降值位置不变，数值约为 6 mm，第三层土体开挖完成之后，对周围土体影响较小，地表沉降改变不大，说明周边地层已经趋于稳定的状态。第四层土体开挖完成之后，土体的最大沉降略有增大，基坑外侧边缘处地表最大沉降值达到 3.6 mm，且距离基坑 20 m 外的土体在这时发生微弱的沉降，说明随着开挖进行到一定深度，土体与围护桩之间会发生相对错动，桩身和土体此时产生一定的滑移，开挖产生的影响就进一步扩大，扰动到远处土体。



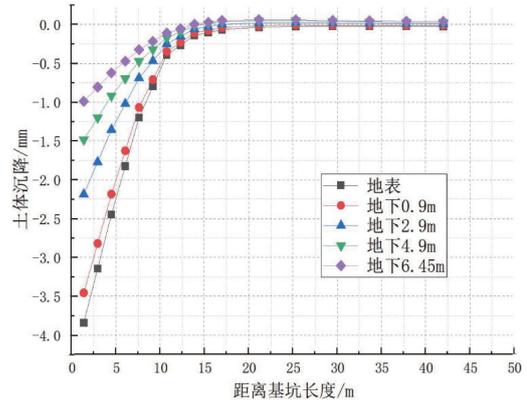
(a) 第一层开挖



(b) 第二层开挖



(c) 第三层开挖



(d) 第四层开挖

图7 基坑外部土体沉降  
Fig. 7 The settlement of soil outside foundation pit

### 3 基坑侧壁及支护桩变形分析

#### 3.1 基坑侧壁位移分析

在土体的开挖过程中，基坑侧面的土体位移情况最能直观的反映出支护效果的好坏，基坑面很容易因变形过大而发生坍塌，所以在各个开挖工况下，对纵向基坑面和主要支护桩进行位移监测，监测位置如图 8 所示，深度范围为从地表至地下 15 m 处。

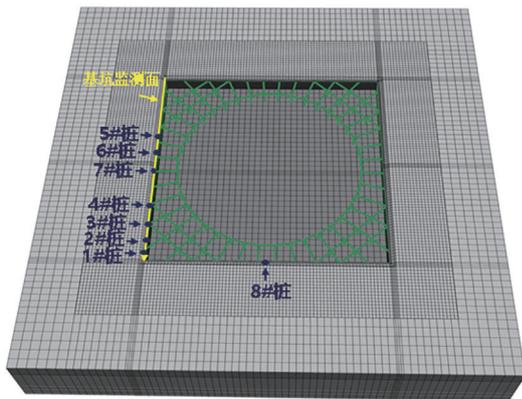
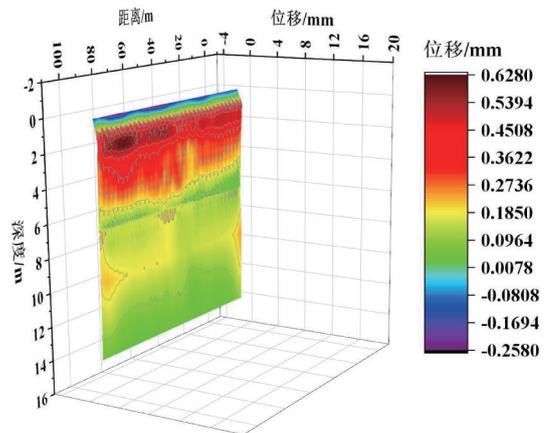


图8 监测面位置示意  
Fig. 8 The position diagram of monitoring surface

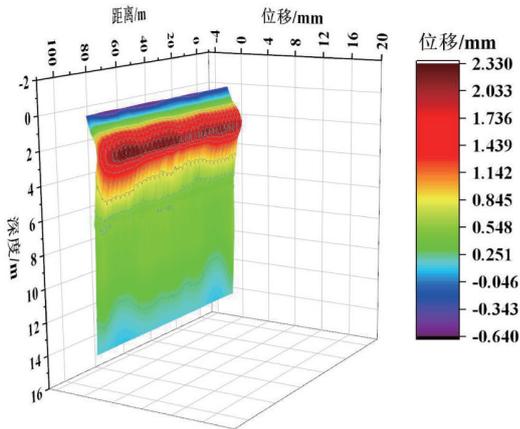
四次开挖后，基坑侧壁的位移监测结果如图 9 所示，第一层开挖 0.9 m 完成之后，基坑侧壁的横向位移很小，最大值只有约 0.63 mm，顶端出现的负向位移可能是由于内部横撑作用，且位移随深度变化而变化，呈现先增大后减小的趋势。第二

层开挖 1.9 m 完后之后，基坑侧壁顶端负向位移值增大至 4.3 mm，随着深度的增加横向位移逐渐增大，在 3 m 深度处出现位移的最大值约为 2.3 mm，3 m 以下的深度后土体位移开始减小至 0.8 mm。第三层开挖 1.9 m 完后之后，基坑侧壁的土体位移最大值出现在深度 4 m 左右的高度位置，最大的横向位移约为 6 mm，随着深度的增加，土体的横向位移逐渐减小至 1.1 mm。第四层开挖 1.55 m 完后之后，侧壁土体位移的最大值依旧处于 4 m 的深度处，横向位移值增大至 18 mm，逐渐减小到基坑底部有大约 6 mm 的横向位移。这说明基坑侧壁的最大位移不是发生在顶端和低端，而是位于开挖面中心深度偏下位置处。

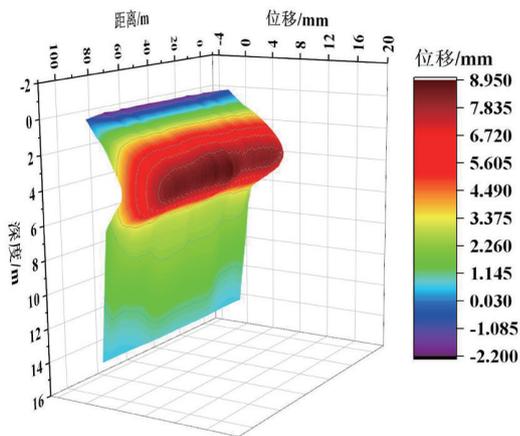


(a) 第一层开挖 0.9 m

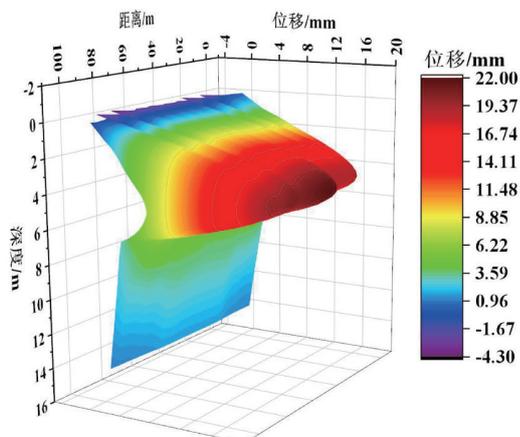
# 岩土力学



(b) 第二层开挖 1.9 m



(c) 第三层开挖 1.9 m



(d) 第四层开挖 1.55 m

图9 基坑侧壁土体位移

Fig.9 The soil displacement of foundation pit sidewall

## 3.2 支护桩位移分析

在基坑的分层开挖下，支护桩的形变反映了

其受力特点和支护体系的最不利位置，这里对主要监测桩的桩身的水平位移监测结果如图 10 所示，监测了第四次开挖结束后的桩顶端至桩底端的横向位移分布。由图可见由支护桩的桩顶部至底部，其形变呈现出先增大后减小的趋势，同时基坑边界支护桩的中心位置处出现最大的形变，端部支护桩承担荷载较少，中部区域支护桩承受荷载较大，且越靠近中心处的桩体位移相差越小，均体现了支护桩的受力机理。

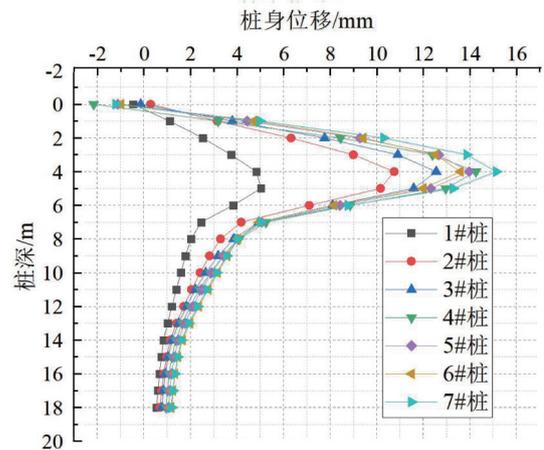
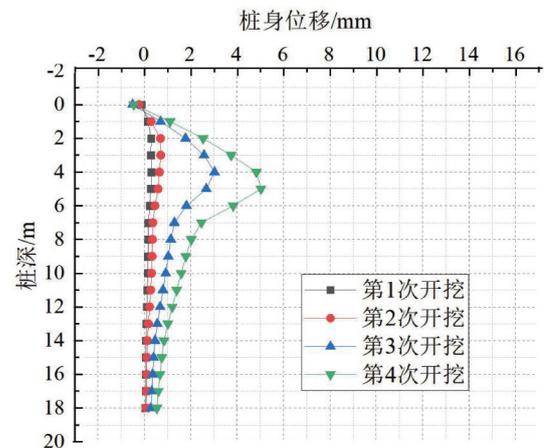


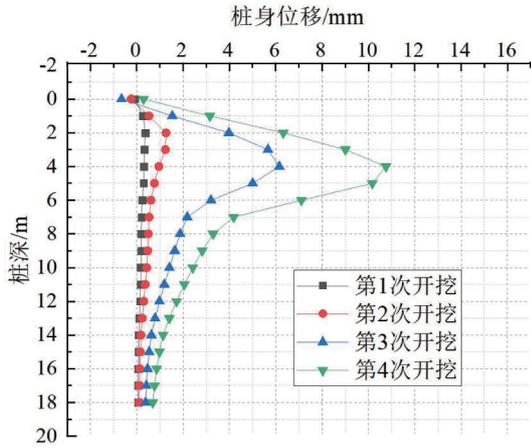
图 10 1-7#桩第四次开挖后桩身位移

Fig.10 Displacements of 1-7 # piles after the fourth excavation

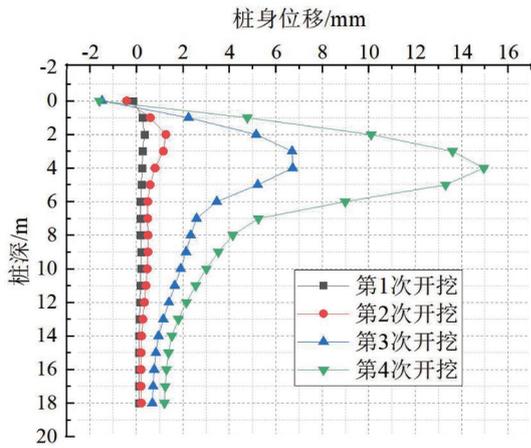
这里对典型的 1#桩、2#桩、7#桩、8#桩进行主要研究，对其在四次开挖工况下的桩身位移变化情况进行分析，监测结果如图 11 所示，四根桩的位移变化均为从桩顶至桩底先增大后减小，且各支护桩的顶端由于冠梁和内支撑的作用会产生



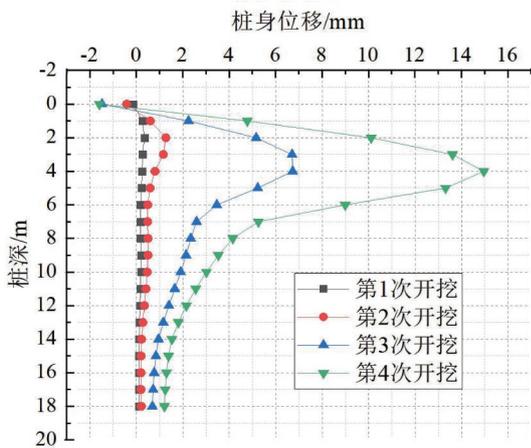
(a) 1#桩四次开挖工况下位移



(b) 2#桩四次开挖工况下位移



(c) 7#桩四次开挖工况下位移



(d) 8#桩四次开挖工况下位移

图 11 关键桩在分层开挖下桩身位移  
Fig. 11 Displacement of key piles under layered excavation  
一定的负位移，各支护桩均在第四次开挖工

况下达到位移最大值，且第一次开挖和第二次开挖对各支护桩的影响不大，四根桩前两次开挖导致的桩身位移均在 1 mm 以内，第四次开挖后 1#桩最大位移达到 5 mm，2#桩最大位移达到 11 mm，7#桩最大位移达到 15 mm，8#桩最大位移也达到 15 mm，可见位于边界中心的 7#和 8#桩的桩身位移十分接近。

### 3.3 支护体系轴力与力矩

基坑四次开挖结束后，SMW 工法桩+圆环内支撑的联合支护体系受力情况如图 12 所示，可以很好的观察出该体系的受力特征，对于基坑四周的支护桩，其边界中心位置的桩身承担了更多的荷载，同样也会引起更大的变形，并且从桩顶至桩底表现出先增大后减小的趋势，最大轴力主要集中在桩身中心位置。而联合支护体系在基坑开挖过程中起着限制土体变形，维持基坑稳定性的作用，对于内部的圆环内支撑受力相对均匀，其最容易发生形变的位置为圆环内撑相交的立柱构造处。

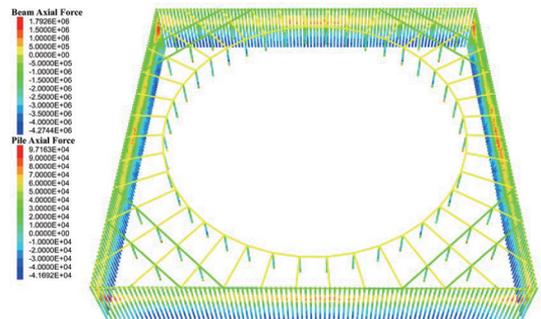


图 12 开挖完成后支护体系受力  
Fig. 12 The stress of supporting system after excavation

## 4 结论

基于典型基坑工程实例，开展了有限差分数值模拟研究，建立了 SMW 工法桩+环形内支撑联合基坑支护体系，对降水工况及基坑开挖过程中土体的位移和支护桩受力特征进行了分析，得到主要结论如下：

- 1) 降水工况下，基坑的土体沉降主要集中在开挖范围内及基坑的边缘处，随着开挖的进行，基坑边缘处的土体沉降分界线呈圆弧状，基坑底部土体因卸荷会产生回弹，对于开挖深度为 6.5 m

## 岩土力学

时, 基坑中心位置会产生约为 4.5 mm 最大回弹值。

2) 基坑开挖过程中, 对坑边 20 m 范围内的土体影响较大, 且表现为从远到近、从地表至地下 6.5 m 影响程度逐渐减小。基坑侧壁的变形随开挖加深而增大, 呈现出先增大后减小的趋势, 侧壁变形最大位移在 5 m 深度附近, 一般位于靠近边界中心位置。

3) 对于基坑周围支护桩, 在边界中心位置处的支护桩变形最大, 承受较多的荷载, 且开挖至最后阶段时, 支护桩和土体位移改变较大, 同时在基坑平面为规则的方形、圆形或者横向纵向尺寸相差不大时, 圆环内支撑体系整体受力均匀, 研究结果可为基坑支护工程提供参考

### 参 考 文 献

- [1] 高阳, 孙浩凯, 刘日成. 基坑的双排桩支护设计及变形规律 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2019, 49 (3): 137-140.
- [2] 蔡子勇, 汤建铭, 唐建桥, 等. 深厚软土基坑地下连续墙支护优化设计及其评价 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (9): 2299-2306.
- [3] 李元勋, 朱彦鹏, 王邓岨. 预应力作用下深基坑桩锚支护结构整体稳定性分析研究 [J]. 工程力学, 2017, 34 (11): 167-174, 239.
- [4] 王岚, 韩广森. 某住宅小区二期地下室基坑支护设计 [J]. 建筑结构, 2016 (S2): 545-549.
- [5] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 内支撑结构基坑的空间效应及影响因素分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (8): 2293-2298, 2306.
- [6] 王占生, 潘皇宋, 庄群虎, 等. 基坑围护 SMW 工法桩施工对下卧盾构隧道变形影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (S1): 53-56.
- [7] 彭国东, 吴立, 吕程伟. 某软土地区 SMW 工法桩基坑支护设计探讨 [J]. 建筑结构, 2019, 49 (S2): 915-919.
- [8] 伍丽珍, 邹仁华, 曹青, 等. 黄土地区 SMW 工法桩与预应力锚索联合支护深基坑监测分析 [J]. 施工技术, 2014, 43 (13): 59-62.
- [9] 宫喜庆. 基坑支护环形支撑的布置及优化 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [10] 曾运平, 卢松, 陈腾力, 等. 中国尊大厦坑中坑复杂支护结构中角撑体系施工技术 [J]. 施工技术, 2019, 48 (4): 10-13.
- [11] 贺振昭, 杨新, 叶超, 等. 地铁深基坑内支撑结构优化分析 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28 (1): 68-78.
- [12] YU C. Analysis on Influence of Foundation Pit Excavation Supported by Large Diameter Ring Beam on Surrounding Environment [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242 (5): 52025.
- [13] 王春艳, 张方涛, 马郎, 等. 基坑圆环支撑体系水平刚度系数计算方法研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (3): 840-846.
- [14] 龚昕, 丁文其, 赖允瑾, 等. 双圆环形支撑体系在基坑工程中的应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (1): 179-183.
- [15] 陈敏华, 陈增新, 张长生. FLAC 在基坑开挖分析中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (z1): 1437-1440.
- [16] 马宏, 季聪, 杨瑞刚, 等. 利用 FLAC 3D 对基坑支护数值模拟分析 [J]. 世界地质, 2013, 32 (4): 857-861.
- [17] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [18] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (4): 1075-1082.