

引文格式:管大刚,胡志明,郑鹏鹏,等. 开挖顺序及内支撑早期刚度对软土基坑稳定性影响规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(2): 181-190.

GUAN Dagang, HU Zhiming, ZHENG Pengpeng, et al. Influence laws of excavation sequence and early stiffness of inner support on stability of foundation pit in soft soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 181-190.

DOI: 10.19815/j.jace.2022.03084

# 开挖顺序及内支撑早期刚度对软土基坑稳定性影响规律

管大刚<sup>1,2</sup>, 胡志明<sup>1</sup>, 郑鹏鹏<sup>1</sup>, 袁山<sup>2</sup>, 陈保国<sup>2</sup>, 张艳林<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**深基坑开挖变形控制是软土基坑工程的难题, 工程中常采用密集的混凝土内支撑来提高支撑刚度, 然而实际工程中未能合理考虑软土深基坑的开挖顺序和混凝土内支撑早期刚度影响, 往往导致基坑实际变形远大于设计值。结合珠三角水资源配置工程的软土深基坑, 利用验证后的数值模拟方法研究了不同开挖顺序及混凝土内支撑早期刚度对基坑受力和变形特性的影响规律, 得出了分层分区非对称开挖和对称开挖对地连墙水平位移和地表沉降的影响规律。结果表明: 尽管非对称开挖会造成基坑两侧的地连墙位移和地表沉降差异, 但是密集内支撑条件下非对称开挖比对称开挖对于基坑周围地表沉降和地连墙水平位移影响更小并能够大量节约工期; 受混凝土内支撑早期刚度影响, 施作内支撑后越早进入下一步开挖, 地连墙水平位移和周围地表沉降越大; 考虑内支撑早期刚度影响时基坑上部的内支撑轴力会增大, 而下部的内支撑轴力会减小, 早期刚度越小, 这种趋势越明显; 现场施工时难以实时动态监测混凝土的弹性模量, 极易造成内支撑轴力的早期监测数据失真, 甚至给工程带来错误决策。

**关键词:**深基坑; 软土; 开挖顺序; 混凝土内支撑; 早期刚度; 变形特性

中图分类号: TU94

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)02-0181-10

## Influence laws of excavation sequence and early stiffness of inner support on stability of foundation pit in soft soil

GUAN Dagang<sup>1,2</sup>, HU Zhiming<sup>1</sup>, ZHENG Pengpeng<sup>1</sup>, YUAN Shan<sup>2</sup>,  
CHEN Baoguo<sup>2</sup>, ZHANG Yanlin<sup>1</sup>

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** Deformation control of deep excavation is a difficult problem for deep foundation pit engineering in soft soil, and dense concrete inner supports are often used in engineering to improve support stiffness. However, the excavation sequence of deep foundation pit in soft soil and the early stiffness of concrete inner support are not reasonably considered in practice, which often cause the actual deformation of the foundation pit greater than the design value. According

收稿日期: 2023-03-21

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178370); 中国电建集团铁路建设有限公司科技项目(ZJSP-KY-001-YN)

作者简介: 管大刚(1974-), 男, 高级工程师, E-mail: 609358061@qq.com。

通信作者: 陈保国(1981-), 男, 工学博士, 副教授, E-mail: baoguo\_chen@126.com。

to the deep foundation pit in the Pearl River delta water resources allocation project, the verified numerical simulation method was used to study the influence laws of different excavation sequences and the early stiffness of concrete inner supports on the stress and deformation characteristics of soft soil foundation pit. The influence laws of asymmetric and/or symmetrical excavation on the diaphragm wall horizontal displacement and ground surface settlement were obtained. The results show that although asymmetric excavation will cause the displacement of diaphragm wall and surface settlement difference on both sides of foundation pit, asymmetric excavation can reduce time significantly compared with symmetrical excavation in the case of dense inner support. Moreover, due to the early stiffness of the concrete inner support, the earlier the next excavation is carried out after the applying inner support, the greater the diaphragm wall horizontal displacement and ground surface settlement will be. Considering the influence of the early stiffness of the inner support, the axial force of the inner support in the upper part of the foundation pit will increase, while the axial force of the inner support in the lower part will decrease, this trend will be more obvious at a lower early stiffness. Meanwhile, it is difficult to dynamically monitor the elastic modulus of concrete in real time during on-site construction, which is easy to cause the distortion of early monitoring data of inner support axial force, and even bring wrong decision-making to the project.

**Key words:** deep foundation pit; soft soil; excavation sequence; concrete inner support; early stiffness; deformation characteristic

**Author resumes:** GUAN Dagang(1974-), male, senior engineer, E-mail: 609358061@qq.com; CHEN Baoguo(1981-), male, PhD, associate professor, E-mail: baoguo.chen@126.com.

# 0 引言

富水淤泥质软土深基坑工程由于其地层条件差、深基坑内支撑密集,导致施工难度大、工期紧张,而且内支撑早期刚度变化引发了一系列值得关注的工程难点问题<sup>[1-6]</sup>。19 世纪 30 年代 Terzaghi 等<sup>[7-8]</sup>首次提出了总应力法理论,经过不断的发展和修正,这一理论成为普遍被大家认可的基坑变形基本理论。程康等<sup>[9]</sup>以杭州软黏土区某 30.2 m 深大基坑工程为研究对象,总结了类似工程地连墙应力、支撑轴力、地表沉降的发展规律。李福林<sup>[10]</sup>对软土地区狭长型深基坑开挖引起的土体变形进行研究,发现拆撑后不及时施作梁板结构会削弱整体支护刚度,且空间效应会导致基坑长边水平及竖向位移大于短边,坑角最小。鲁泰山等<sup>[11]</sup>认为软土地层基坑开挖会对土体产生扰动,且这种扰动会明显增加地基沉降量。徐江等<sup>[12]</sup>对某地铁深基坑施工过程进行建模并对比分析计算值与现场实测值,结果表明地连墙水平位移会在开挖最后一层土体后无支撑作用时明显增大,支撑轴力也会在下一层土体开挖时发生突变。孙九春等<sup>[13]</sup>针对现有的基坑分层、分块开挖方法,将盆式挖土法应用到软土地铁基坑分块开挖

的每一土块当中,发现该方法可以有效控制基坑变形。Chen 等<sup>[14]</sup>以世纪大都会基坑工程为背景,研究了分区开挖对邻近隧道的影响,结果表明分区开挖能明显减小对邻近隧道的影响。Long<sup>[15]</sup>通过对比研究大量基坑工程的监测数据发现,基坑开挖深度、围护结构刚度以及内支撑刚度等是影响周围土体变形的主要因素。Finno 等<sup>[16]</sup>通过有限元数值模拟软件研究了基坑开挖深度、围护结构整体刚度和基坑隆起系数对基坑稳定性的影响。刘美麟等<sup>[17]</sup>对深基坑内撑式支护结构综合刚度进行研究,发现基坑围护结构最大变形随着支护体系刚度增大不断减小,增大到一定程度后变形趋于稳定。金亚兵等<sup>[18]</sup>研究了温度变化对深基坑内支撑轴力和变形的影响,简化了支撑温度应力的计算方法。张戈等<sup>[19]</sup>对软土地区深基坑围护结构综合刚度进行研究,提出了一种用于预测围护结构变形特性的综合刚度模型。贺振昭等<sup>[20]</sup>认为不同支撑数量会影响支护结构的刚度,利用 Plaxis 3D 有限元软件对比分析了武汉某地铁车站深基坑采用 5 道和 6 道内支撑两种方案下的不同影响,研究表明多一道内支撑会使得刚度增加近 1 倍,但在工程当中过于保守,没有兼顾经济性。基坑支撑轴力监测原始值与真实值

存在较大误差,其主要影响因素为混凝土的收缩徐变和弹性模量<sup>[21-24]</sup>。

目前,关于软土地区密集内支撑情况下分层分区开挖顺序的影响规律尚不明确;现行《建筑基坑支护技术规程》<sup>[25]</sup>按照混凝土弹性模量的设计值来计算围护结构变形和内支撑轴力,未能考虑混凝土内支撑早期刚度的影响。实际工程中通常认为钢筋混凝土结构强度达标便可进行下一步施工,由于工期和施工工序的影响,混凝土内支撑弹性模量往往并未达到规范值便开始下一步施工,导致基坑实际变形远大于设计计算值,且混凝土内支撑早期刚度低,弹性模量难以准确得出,导致轴力实测值也不准确。内支撑早期刚度变化对基坑稳定性的影响值得深入研究。

本文以珠三角水资源配置工程中的软土深基坑为背景,采用验证后的数值模拟方法对基坑施工全过程进行仿真分析,研究分层分区开挖顺序的影响规律,为现场施工选取合理施工顺序提供参考。同时研究了不同施工工期下混凝土内支撑早期刚度变化引起的地连墙水平位移和地表沉降变化规律,以期为实际工程提供参考。

## 1 数值模拟及验证

### 1.1 工程问题分析

珠江三角洲水资源配置工程土建施工 B1 标位于广州市南沙区高新沙围。本工程为高新沙泵站主泵房及副厂房的基坑工程(图 1),基坑尺寸为 92 m×48.5 m,基坑地连墙顶标高为 2.0 m,地连墙深度为 32.5 m。冠梁及第 1 道混凝土支撑顶标高 1.5 m,第 2 道支撑标高-4.1 m,第 3 道支撑标高-8.1 m,第 4 道支撑标高-11.6 m,第 5 道支撑标高-15.1 m,第 6 道支撑标高-18.5 m。坑底标高-19.3 m,基坑深度为 21.3 m,采用 1 m 厚地连墙与 6 道钢筋混凝土内支撑+立柱的支护体系,其中第 1、2 道支撑尺寸为 1 000 mm×1 200 mm,第 3、6 道支撑尺寸为 1 200 mm×1 200 mm,第 4、5 道支撑尺寸为 1 200 mm×1 400 mm。泵房基坑开挖深度大于 20 m,为深基坑;地下水埋深约 1.0 m,地基土以淤泥土层和砂土层为主。基坑所在地层主要为淤泥和淤泥质黏土,其较差的力学性质给工程带来了巨大挑战。

基坑内支撑密集、场地狭窄,不利于设备开挖作业,而且现场主要为软土地层,地质条件差。因此,需要确定合理的现场开挖顺序,在保证安全的同时



图 1 施工场地环境

Fig. 1 Construction site environment

节约工期。在分区开挖、分区支护时,现场施工进度对混凝土内支撑早期刚度的影响以及内支撑早期刚度变化对基坑变形的影响难以预估。

### 1.2 数值建模

采用数值分析软件 MIDAS GTS NX 建立实际工程的三维数值模型(图 2),模型尺寸为 300 m(长)×230 m(宽)×80 m(高)。顶部设置为自由边界,四周约束法向位移,底部设置为固定边界。土体采用 Mohr-Coulomb 模型。为了便于建模分析,地层划分为 7 个土层,各土层厚度由上至下依次为 4.1、3.5、9、3.9、5.5、3、51 m。工程中采用地连墙围护结构,地连墙进入低渗透土层;现场施工只需进行基坑内降排水,且在施工时对坑外地下水位进行动态监测,必要时采用回灌的方式保持水头稳定,故数值模拟中没有考虑地下水的影响。各土层物理力学参数如表 1 所示。

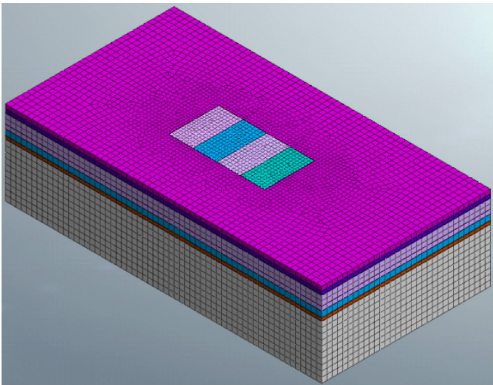
基坑周围土体及围护结构采用三维实体单元,内支撑和立柱采用线性梁单元,地连墙采用板单元。内支撑、地连墙和立柱尺寸与实际尺寸相同,地连墙和内支撑采用 C30 混凝土,立柱采用 Q235 钢,模拟时采用线弹性模型,围护结构物理力学参数见表 2。

### 1.3 数值模拟过程

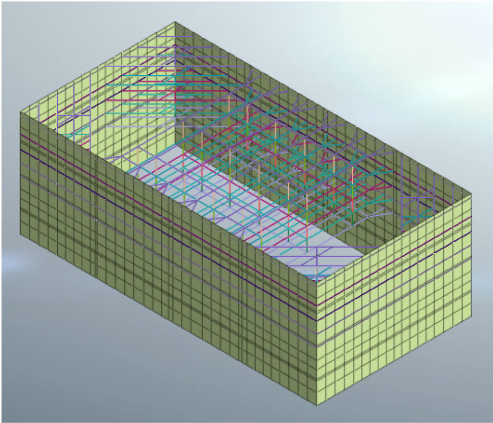
为研究不同开挖顺序对基坑受力和变形特性的影响,结合工程实际将模拟基坑划分为 4 个施工区。考虑到密集内支撑施工难度大,首先分析 2 个基本开挖方案(方案一、二),开挖示意图如图 3、4 所示。

方案一为对称开挖,先开挖施工区 2、3,绑扎钢筋,再开挖施工区 1、4,开挖到对应内支撑位置后绑扎钢筋,然后一起浇筑本层的内支撑混凝土,按此顺序依次开挖到坑底。

方案二为非对称开挖,从基坑南侧向北侧按顺序依次开挖 1、2、3、4 四个施工区,每开挖一区到对应内支撑位置后就绑扎钢筋,然后同时浇筑本层的内支撑混凝土,按此顺序依次开挖到坑底。



(a) 三维地基模型



(b) 结构模型

图 2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers					
材料	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	摩擦 角/( $^{\circ}$ )
淤泥	0.33	1 820	7.20	4	6
含淤泥质粉 细砂、细砂	0.36	1 850	17.84	8	18
淤泥、淤泥质 黏土	0.34	1 760	6.80	6	7
泥质粉细砂、 中细砂	0.22	1 900	29.02	5	23
含有机质粉质 黏土	0.25	1 780	6.70	11	12
强风化粗砂岩	0.28	2 100	40.00	50	26
弱风化泥质 砂砾岩	0.23	2 300	80.00	300	30

表 2 支护结构参数

Table 2 Parameters of supporting structure			
支护结构	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
地连墙	25.0	30.0	0.20
钢立柱	78.9	200.0	0.27
内支撑	25.0	30.0	0.20

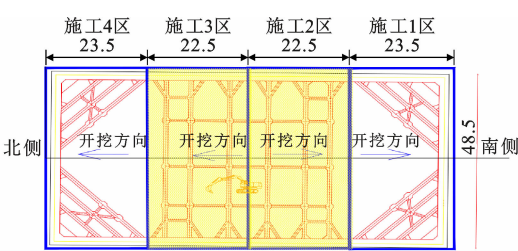


图 3 方案一开挖顺序示意图(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram of excavation sequence of scheme 1 (unit:m)

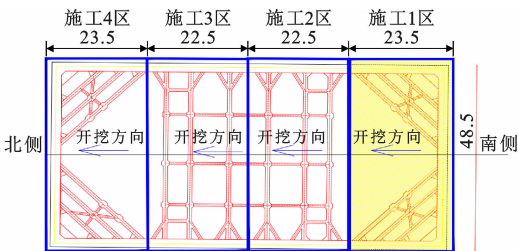


图 4 方案二开挖顺序示意图(单位:m)

Fig. 4 Schematic diagram of excavation sequence of scheme 2 (unit:m)

实际工程中,鉴于施工工期紧张,对方案二的内支撑施工顺序进行优化,由原来的整体施作内支撑改为分区施作内支撑,优化后的方案三如图 5 所示。每一层 1 区开挖完后随即转入支撑施工,同时开挖第 2 区;当第 3 区开挖时,第 1 区内支撑浇筑完成,第 2 区在绑扎钢筋;第 4 区开挖时第 2 区内支撑浇筑完成,第 3 区在绑扎钢筋;如此往复开挖至坑底。

在上述方案三的基础上,根据内支撑混凝土弹性模量随时间的变化规律曲线确定内支撑刚度在混凝土龄期全过程的变化规律,从而模拟内支撑早期刚度对基坑开挖的影响规律。

1.4 数值模型验证

依据朱伯芳的弹性模量公式<sup>[26-27]</sup>绘出 C30 混凝土的弹性模量随龄期的变化曲线(图 6),根据内支撑所用的混凝土弹性模量随时间的变化函数及内支撑截面几何尺寸确定相应龄期的内支撑刚度函数。根据现场开挖施工进度计划表,现场施工 1、2 道支撑及土层开挖采用方案二方式,之后改用方案三方式,每个施工工序的时间均为 2~4 d。根据刚度函数确定不同时期内支撑早期刚度值,模拟得出开挖到坑底时南侧地连墙水平位移数据最大。将其与现场实测地连墙(南侧)的水平位移进行对比分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,数值模拟结果和现场监测得到的地连墙水平位移变化规律相同,且最大位移值接近,相对误差为 1.7%。由此验证了



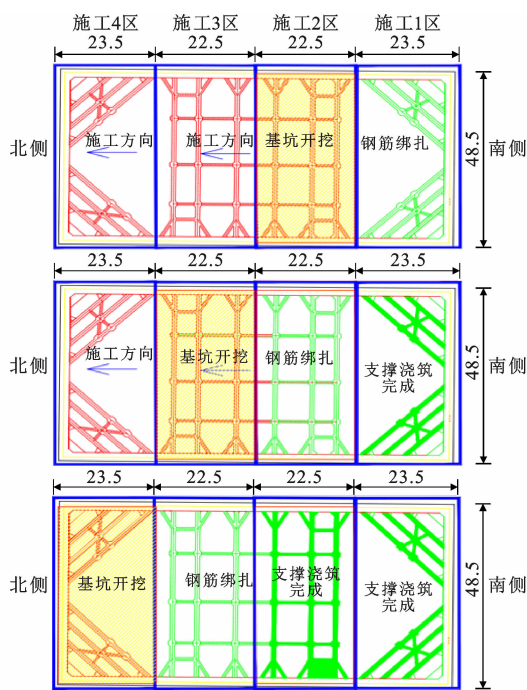


图 5 方案三开挖示意图

Fig. 5 Schematic diagram of excavation in scheme 3

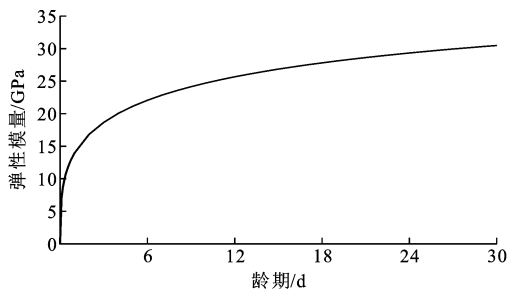


图 6 C30 混凝土弹性模量曲线

Fig. 6 Elastic modulus curve of C30 concrete

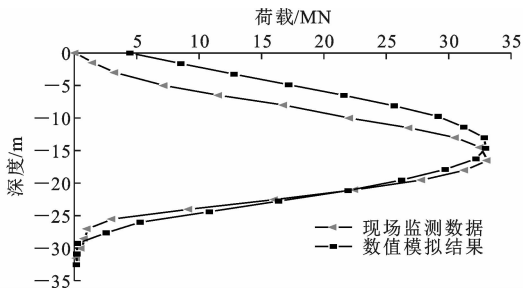


图 7 地连墙水平位移验证

Fig. 7 Verification of horizontal displacement of diaphragm wall

数值模拟方法的合理性与准确性。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 不同开挖顺序影响规律

根据方案一和方案二的数值模拟结果对比分析

对称开挖和非对称开挖的影响规律。数值模拟发现,同一开挖方案下,东侧和西侧地连墙水平位移、地表最大沉降几乎相等,最大水平位移为 25.01 mm,发生在地连墙东、西侧中间,距离墙顶部约 16.2 m 位置;地表最大沉降为 5.34 mm,发生在距离地连墙 12 m 位置。对称和非对称开挖两种方案下,由于该基坑的东西向水平支撑较为密集,东侧和西侧地连墙最大水平位移、地表最大沉降均小于相同开挖方案时南侧和北侧地连墙最大水平位移、地表最大沉降。

现进一步分析两种开挖方案下南北两侧地连墙水平位移和地表沉降以及内支撑轴力,开挖到坑底时地表沉降曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,方案一开挖到坑底时地表沉降最大值发生在基坑南北两侧,由于对称开挖,南北两侧最大沉降量基本相同,最大值为 5.84 mm。方案二开挖到坑底时基坑南北两侧沉降值出现差异,南侧最大沉降值为 5.19 mm,北侧最大沉降值为 4.80 mm。方案一比方案二最大沉降值大 12.5%,方案二的南北两侧沉降值相差 8.1%。

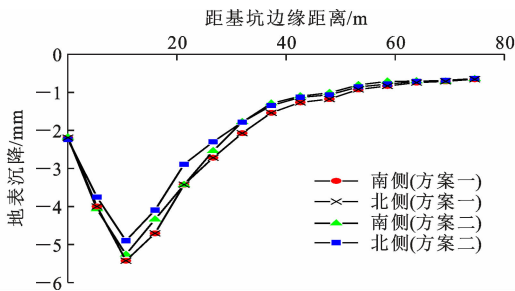


图 8 不同方案下地表沉降规律

Fig. 8 Surface settlement law under different schemes

不同开挖方案下开挖到坑底时地连墙水平位移值如图 9 所示。方案一开挖到坑底时地连墙的最大水平位移出现在南北两侧地连墙,由于对称开挖,南北两侧地连墙最大水平位移基本相同,最大值为 28.27 mm。方案二开挖到坑底时地连墙水平位移出现在南侧地连墙,最大值为 27.31 mm,北侧地连墙最大水平位移值为 25.94 mm。方案一与方案二地连墙水平位移极值最大相差约 9.0%,方案二的南北两侧地连墙水平位移最大值相差约 5.3%。

图 10 为开挖全过程中两种方案下的各道支撑最大轴力值变化规律。可以看出,内支撑的轴力随着开挖深度增加总体上呈逐渐增大的趋势,但会略有波动。两种方案下第 1、2、3 道支撑的最大轴力值变化趋势较为接近,而第 4、5 道支撑的最大轴力值相差较大。非对称开挖到坑底时第 4 道支撑最大轴

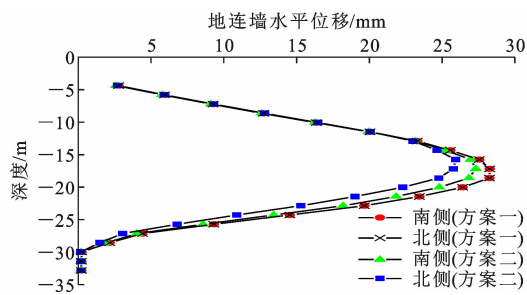


图 9 不同方案下地连墙水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of diaphragm wall under different schemes

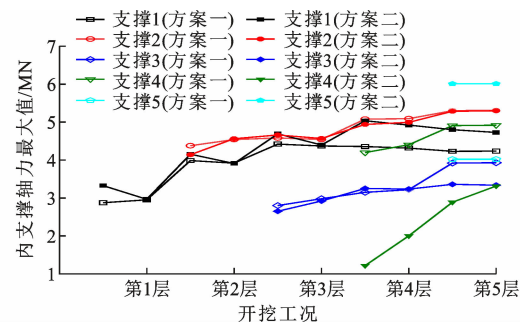


图 10 各道支撑最大轴力值变化规律

Fig. 10 Variation law of maximum axial force of each support

力值为 3 316.57 kN,第 5 道支撑的最大轴力值为 6 010.27 kN;对称开挖到坑底时第 4 道支撑的最大轴力值为 4 916.95 kN,第 5 道支撑的最大轴力值为 4 022.22 kN。

从模拟结果来看,对称开挖与非对称开挖对地连墙水平位移影响差异约为 9%,对地表沉降的影响差异在 12%左右。值得注意的是,非对称开挖中,南北两侧的地连墙水平位移和地表沉降会出现差异,其主要原因是基坑由南向北顺序开挖,而内支撑在整层开挖完成后整体施加,南侧坑外土体相较于北侧土体开挖后无支撑的时间更长,时空效应更为显著。随着开挖深度增大,非对称开挖相较于对称开挖对内支撑轴力的影响会增大。

2.2 钢筋混凝土内支撑早期刚度影响规律

首先不考虑工期的影响,假设下一层开挖前混凝土弹性模量均达到设计值(C30 混凝土弹性模量取 30 GPa),通过比较方案二与方案三的数值模拟结果,分析内支撑施作工序的差异对基坑的影响规律。然后在方案三的基础上考虑各个工序的施工周期,研究各个工序的施工周期引起的内支撑早期刚度变化对基坑变形和内支撑受力特性的影响规律。

图 11 为方案二与方案三南侧地连墙水平位移

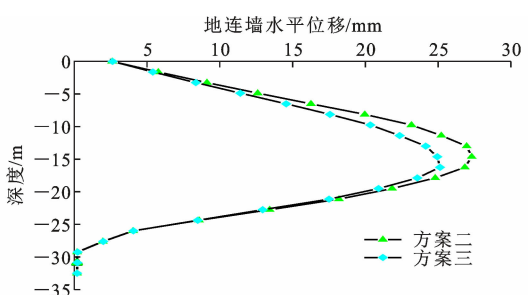


图 11 方案二与方案三地连墙水平位移

Fig. 11 Horizontal displacement of diaphragm wall under scheme 2 and scheme 3

变化规律。采用方案三施工(内支撑分区支护方式)时地连墙的最大水平位移值为 25.14 mm,与方案二相比最大水平位移减小了 8.6%。图 12 为方案二与方案三基坑南侧地表沉降分布规律,方案三地表沉降最大值为 4.26 mm,相较于方案二的 5.19 mm 减小了 17.9%。

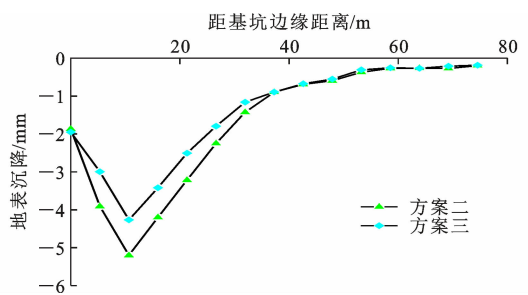


图 12 方案二和方案三地表沉降规律

Fig. 12 Surface settlement law under scheme 2 and scheme 3

由分析结果可知,在不考虑内支撑刚度变化的情况下,采用方案三分层分区开挖并及时分区支护的方式,基坑的变形控制效果更好。

然而,淤泥地层深基坑的内支撑较为密集,现场施工工期紧张,往往为了工程进度在钢筋混凝土内支撑早期刚度较低时提前进行下一步开挖作业。这将导致围护结构变形和地表沉降与设计结果产生很大偏差。现将模拟每道施工工序时间为 2 d 和 4 d (对应 C30 混凝土弹性模量为 16.8 GPa 和 20.0 GPa)时内支撑早期刚度变化对基坑开挖的影响规律。

图 13 为考虑内支撑早期刚度影响下的地连墙水平位移变化规律。当每道施工工序时间为 4 d 时,地连墙的最大水平位移值为 28.91 mm,比不考虑早期刚度影响的情况增大了 15.0%;当每道施工工序时间为 2 d 时,地连墙的最大水平位移值为 32.56 mm,比不考虑早期刚度影响的情况增大了

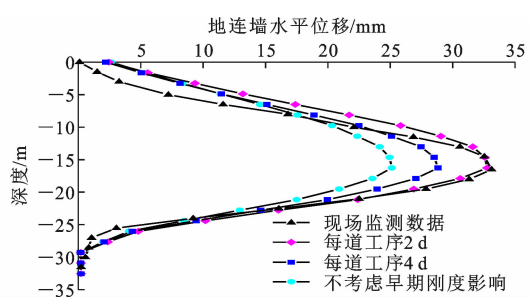


图 13 早期刚度对地连墙水平位移影响规律

Fig. 13 Influence law of early stiffness on horizontal displacement of diaphragm wall

29.5%。图 14 为考虑早期刚度影响下的地表沉降分布规律。当每道施工工序为 4 d 时,地表沉降最大值为 5.85 mm,比不考虑早期刚度影响的情况增大了 37.3%;当每道施工工序时间为 2 d 时,地表沉降最大值为 8.05 mm,比不考虑早期刚度影响的情况增大了 89.0%。

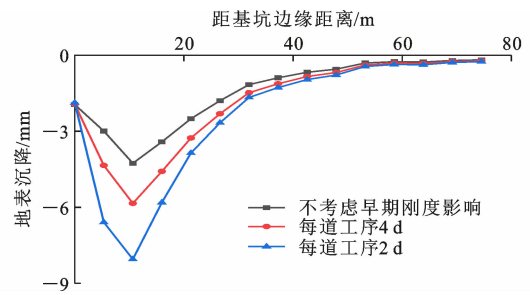


图 14 早期刚度对地表沉降影响规律

Fig. 14 Influence law of early stiffness on surface settlement

从模拟结果可以看出,在不考虑混凝土内支撑早期刚度影响的情况下,数值模拟的结果小于现场实测结果。实际施工中,大多数情况下并未等到施作的内支撑刚度达到设计值时再进行下一步施工,每道施工工序时间越短,内支撑早期刚度会越小,地连墙水平位移和地表沉降均会增大。

图 15 为考虑早期刚度影响下开挖全过程各道内支撑轴力值变化规律。可以看出,内支撑轴力总体上随着开挖深度的增大而增大,第 1 道支撑在开挖至坑底时略有减小。与不考虑早期刚度影响相比,考虑早期刚度影响下第 1 道内支撑轴力会增大,这是由于基坑开挖过程中,后期设置的下部内支撑早期刚度并未达到设计值,其承担的实际轴力值小于理论意义上的计算值。考虑早期刚度影响下的第 4、5 道内支撑轴力会减小,早期刚度越小,其内支撑轴力也越小。这主要是由于基坑开挖施工至底部时,第 4、5 道支撑早期刚度低,抵抗变形能力弱,而

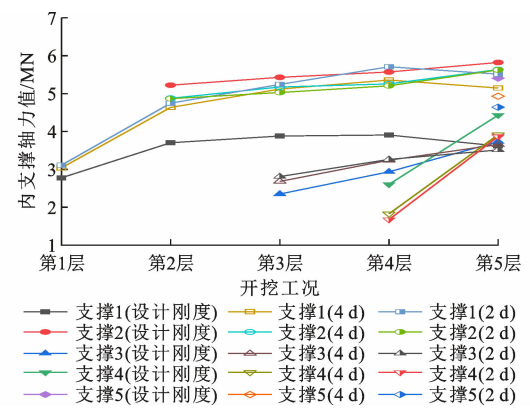


图 15 早期刚度对各道支撑轴力值影响规律

Fig. 15 Influence law of early stiffness on axial force value of each support

上部内支撑刚度随龄期逐渐增大,抵抗水平荷载作用增强。第 2、3 道内支撑处于中间位置,其轴力受早期刚度的影响程度也介于上述内支撑的中间,具有过渡性质。

从上述研究结果可以发现,内支撑早期刚度对轴力的影响规律与早期刚度对地连墙水平位移的影响规律具有一致性。

### 3 讨 论

通过数值模拟对软土地层深基坑工程不同开挖顺序的影响进行研究,为现场施工确定合理开挖顺序提供了依据,保证了软土地区基坑开挖的工程安全及施工效率。从工程模拟结果来看,开挖顺序对于基坑围护结构变形和周围地表沉降的最终影响相差不大,但在开挖过程当中,不同开挖顺序的影响程度存在差异。开挖顺序的确定除了考虑基坑的变形和受力状态,还需考虑现场实际情况,本工程中对称开挖相比于非对称开挖基坑暴露面大 1 倍,实际工程中有 2 个坡面暴露,基坑开挖处于淤泥质土层,施工风险大;由于基坑中间部位支撑密集,限制了现场开挖设备作业,对称开挖时上一层内支撑施工会制约下一层开挖,导致施工过程中极易碰撞支撑梁。而基坑两端(斜撑与对撑之间)有较大的开口,非对称开挖能够形成开挖和内支撑施工连续流水作业。在整体施工工期上,非对称开挖可以节约工期超过 80 d。综合来看,非对称开挖优于对称开挖。通过数值模拟对内支撑施作工序进行优化,结果表明内支撑分区施作支护对基坑的变形控制更为有利,为现场施工方案优化提供了依据,保证了工程安全。

通过分析内支撑早期刚度的影响规律可以发现:早期刚度越小,地连墙的水平位移越大,导致地



连墙的内力越大,因而内支撑的轴力会越小;第 1 道支撑由于施作最早,基坑开挖深度很浅,此时地连墙并未发生较大变形,所以其受后续基坑开挖的影响最大;后续地连墙变形越大,第 1 道内支撑轴力增量越大。开挖施工过程中,应高度重视龄期对内支撑早期刚度的影响,否则内支撑早期刚度影响与内支撑长度误差影响(地连墙向内的弯曲变形导致的内支撑长度误差)叠加,将会导致实际受力状态与原设计严重不符,甚至引起工程事故。

以第 2 道内支撑为例,内支撑最大轴力值现场监测数据与模拟结果对比如图 16 所示。可以看出,内支撑早期刚度对基坑受力和变形特性的影响显著。现场轴力监测数据是根据测得的应变和内支撑刚度计算出来的,混凝土的弹性模量在早期是不断增大的,而现场难以准确获取实时的早期刚度。若按照混凝土结构设计规范中给定的弹性模量值进行计算,导致所得轴力值明显偏大,以至于造成实测轴力值大于承载力设计值的假象。如果不能准确获取内支撑刚度随时间的变化规律,很可能导致内支撑轴力现场监测数据失真。

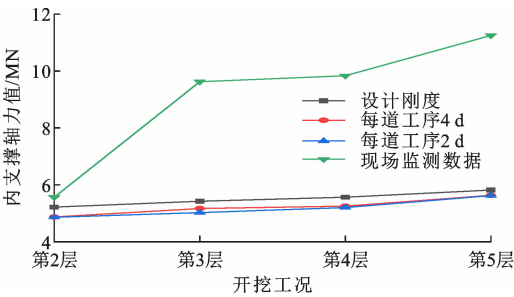


图 16 第 2 道支撑最大轴力值

Fig. 16 Maximum axial force of support 2

4 结 语

(1)采用分层、分区顺序开挖(非对称开挖)方案对地连墙水平位移和基坑周边地表沉降的影响程度小于由中间向两端对称开挖方案。结合现场施工组织,分区顺序开挖能够形成连续流水作业,相较于对称开挖的方案能够大量节约工期。但是,采用分区顺序开挖时,会造成基坑两端地连墙水平位移和地表沉降差异,实际施工中应重点关注这种差异对周边建(构)筑物的影响。

(2)施工过程中每道施工工序时间越短,内支撑早期刚度越小,地连墙水平位移和周围地表沉降越大,甚至实测变形值大于设计计算值。此外,相较于不考虑内支撑早期刚度影响,考虑内支撑早期刚度

影响时基坑上部内支撑轴力会增大,而下部内支撑轴力会减小,早期刚度越小,这种趋势越明显。

(3)现场施工时无法实时监测混凝土的弹性模量,导致现场监测的轴力值与实际受力状态不符。若不考虑早期刚度影响将会导致基坑变形和支护结构内力与设计值存在很大差异,给工程施工带来错误决策,甚至导致重大安全事故。如果不能准确获取混凝土实时弹性模量,建议现场施工时应等到混凝土内支撑弹性模量接近规范给定值再进行下一步开挖施工。

参考文献:

References:

[1] 曹文昭,杨志银,蔡巧灵,等.软土地基超长桩静载试验中桩侧堆载影响分析[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):1-10.  
CAO Wenzhao, YANG Zhiyin, CAI Qiaoling, et al. Effect of surrounding load on static load test of super-long pile in soft soil foundation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 1-10.

[2] 王卫东,胡 耘,沈 健,等.软土地基历史建筑地下空间开发的设计与实践[J].岩土工程学报,2023,45(12):2445-2453.  
WANG Weidong, HU Yun, SHEN Jian, et al. Design and practice of underground space development of existing historical buildings in soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2445-2453.

[3] 于至海,吴旭君,曹文昭.软土深基坑被动区超前加固变形控制效果研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):71-79.  
YU Zhihai, WU Xujun, CAO Wenzhao. Research on deformation control effect of passive zone reinforcement before excavation of deep foundation pit in soft soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 71-79.

[4] 张 楠,李 波,王天成,等.软土地基堤防稳定性离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(增1):222-225.  
ZHANG Nan, LI Bo, WANG Tiancheng, et al. Centrifugal model test of embankment stability on soft soil foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(S1): 222-225.

[5] 李煜峰,傅 怡,徐中华.软土地区紧邻地铁隧道深基坑支护设计与实践[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):128-137.  
LI Yufeng, FU Yi, XU Zhonghua. Supporting design



- and application of deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soil area[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 128-137.
- [6] 陆金钰,舒海港,姜昊瑞. 地下结构-软土地基-钢框架结构相互作用体系地震响应数值模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(增2): 375-384.
- LU Jinyu, SHU Haigang, JIANG Haorui. Numerical simulation study on seismic response of underground structure-soft soil foundation-steel frame structure interaction system[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(S2): 375-384.
- [7] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1967.
- [8] TERZAGHI K. General wedge theory of earth pressure[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1941, 106(1): 68-80.
- [9] 程康,徐日庆,应宏伟,等. 杭州软黏土地区某30.2 m深大基坑开挖性状实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 851-863.
- CHENG Kang, XU Riqing, YING Hongwei, et al. Performance analysis of a 30.2 m deep-large excavation in Hangzhou soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 851-863.
- [10] 李福林. 软土地区狭长型深基坑开挖引起深层土体变形分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 121-127.
- LI Fulin. Analysis on the deep soil deformation induced by construction of narrow long excavation pit in soft ground area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 121-127.
- [11] 鲁泰山,刘松玉,蔡国军,等. 软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 565-573, 580.
- LU Taishan, LIU Songyu, CAI Guojun, et al. Study on the disturbance and recompression settlement of soft soil induced by foundation excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 565-573, 580.
- [12] 徐江,龚维明,穆保岗,等. 软土区某地铁深基坑施工过程数值模拟及现场监测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 590-598.
- XU Jiang, GONG Weiming, MU Baogang, et al. Numerical simulation and monitoring on construction process of deep pit of subway station in soft clay[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(3): 590-598.
- [13] 孙九春,白廷辉. 软土地铁深基坑小尺度盆式挖土法研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1244-1252.
- SUN Jiuchun, BAI Tinghui. Study and application of small scale basin method for deep foundation pit of metro in soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1244-1252.
- [14] CHEN J J, WANG J H, XIANG G W, et al. Numerical study on the movement of existing tunnel due to deep excavation in Shanghai[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS&AGSSEA, 2011, 42(3): 30-40.
- [15] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3): 203-224.
- [16] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 30-36.
- [17] 刘美麟,房倩,张顶立,等. 深基坑内撑式支护结构综合刚度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2059-2064.
- LIU Meilin, FANG Qian, ZHANG Dingli, et al. Research on synthetic system stiffness of strutted retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2059-2064.
- [18] 金亚兵,沈翔,劳丽燕. 温度变化对深基坑内支撑轴力和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1417-1425.
- JIN Yabing, SHEN Xiang, LAO Liyan. Influences of temperature change on axial force and deformation of inner support in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1417-1425.
- [19] 张戈,毛海和. 软土地区深基坑围护结构综合刚度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1467-1474.
- ZHANG Ge, MAO Haihe. A new system stiffness of retaining structure of deep foundation pit in soft soil area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1467-1474.
- [20] 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.
- HE Zhenzhao, YANG Xin, YE Chao, et al. Optimization analysis of supporting structure in deep excavation of metro[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(1): 68-78.
- [21] 徐昭辰,王强,章定文,等. 基坑混凝土支撑轴力监测值修正方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 48-54.
- XU Zhaochen, WANG Qiang, ZHANG Dingwen,

et al. Correction method of axial force monitoring value of concrete strut in excavation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 48-54.

[22] 肖振烨, 李素贞, 崔晓强. 基于应变监测的基坑钢筋混凝土支撑轴力修正方法[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(11): 8-18.

XIAO Zhenye, LI Suzhen, CUI Xiaoqiang. Study on force correction method of reinforced concrete brace shaft in foundation ditch based on strain monitoring [J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(11): 8-18.

[23] 张浩, 吴志鸿, 张峰, 等. 深基坑混凝土支撑轴力精确性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增 1): 342-348.

ZHANG Hao, WU Zhihong, ZHANG Feng, et al. Accuracy analysis on axial force of concrete support in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 342-348.

[24] 张哲. 基坑混凝土支撑轴力监测数据异常情况分析与探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 976-981.

ZHANG Zhe. Analysis and discussion of monitoring data anomaly of axial force for concrete support of foundation pit[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(8): 976-981.

[25] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2012.

[26] 朱伯芳. 混凝土的弹性模量、徐变度与应力松弛系数[J]. 水利学报, 1985, 16(9): 54-61.

ZHU Bofang. Elastic modulus, creep and stress relaxation coefficient of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16(9): 54-61.

[27] 朱伯芳. 再论混凝土弹性模量的表达式[J]. 水利学报, 1996, 27(3): 89-91, 88.

ZHU Bofang. On the formula for modulus of elasticity of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(3): 89-91, 88.