

文章编号: 1006-4710(2012)03-0361-06

# 盾构井深基坑围护结构变形规律及信息化施工研究

李涛<sup>1</sup>, 周志龙<sup>1</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 杨成淳<sup>2</sup>, 王平波<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 北京首都国际机场股份有限公司, 北京 100621)

**摘要:** 深基坑工程围护结构受力变形的现场监测对保证基坑的安全稳定至关重要。以北京地铁10号线某盾构竖井深基坑工程为背景, 阐述了地铁盾构井的监测方案, 对桩体水平位移、钢支撑轴力、桩身弯矩及桩侧土压力等项目进行了现场监测, 并分析了施工开挖过程对桩体水平位移、钢支撑轴力、桩身弯矩及桩侧土压力的影响。分析结果表明: 基坑开挖过程中, 围护桩的最大水平位移的发生位置逐渐下移, 在顶板完成后, 位于距离顶板8 m的位置处; 第二道钢支撑在基坑开挖过程中受力始终最大; 桩体最大弯矩值约为设计值的50%; 桩侧土压力层状分布较为明显。

**关键词:** 深基坑; 围护结构; 现场监测; 信息化施工

**中图分类号:** TU432      **文献标志码:** A

## Research on Displacements Law of Shield Shaft Enclosure Structure and the Informatization Construction Analysis

LI Tao<sup>1</sup>, ZHOU Zhilong<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, YANG Chengchun<sup>2</sup>, WANG Pingbo<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics, Architecture &amp; Civil Engineering, China University of Mining &amp; Technology, Beijing 100083, China; 2. Beijing Capital International Airport Co. Ltd, Beijing 100621, China)

**Abstract:** Field monitoring for enclosure structure subject to deformation in deep pit engineering is essential to ensure the security and stability of deep pit. Based on the shield shaft deep pit engineering of Beijing Subway Line 10, the monitoring alternatives of subway shield shaft are described in this paper. The enclosure structure of horizontal displacement, the steel support axial force, the bending moment of piles and the earth pressures affecting the piles are measured on site. And the relationships among enclosure structure of horizontal displacement, steel support axial force, bending moment of piles, earth pressures affecting the piles in the construction excavation process are estimated. The results show that: the location of maximum horizontal deformation of the pile is gradually downward during excavation, and the location is from the roof 8 m after the roof completion; the second steel support force is always the largest in the excavation process; the maximum bending moment value of piles is about 50% of the design value; the distribution of earth pressure is laminar obviously.

**Key words:** deep pit; enclosure structure; field monitoring; Informatization construction

近年来, 基坑规模和开挖深度的增大使围护结构的变形和稳定问题变得复杂和突出。地下工程中由于地质条件、材料性质、荷载条件、施工条件和外在其他因素的复杂性, 使得很难单纯从理论上预测工程中可能遇到的问题, 从而也不可能全面而准确

地分析工程施工中围护结构的受力变形<sup>[1]</sup>。因此, 做好施工过程中的深基坑围护结构监测工作十分重要<sup>[2]</sup>。变形监测可以为信息化施工提供必要的数据, 对安全施工意义重大<sup>[3]</sup>。

以往大多数的基坑监测工程只起到了一些简单

收稿日期: 2012-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50974126); 博士学科点新教师类专项科研基金项目(20100023120003); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009QL02)。

作者简介: 李涛(1981-), 男, 河南新郑人, 讲师, 工学博士, 研究方向为城市地下工程。E-mail: ltiao@cumtb.edu.cn。

的反馈作用,并未对监测结果进行深入的理论分析。通过监测结果仅仅判断其是否超过控制值和预警,不能结合施工和地质情况对监测成果进行充分、深入的理论分析,获得围护结构的受力变形的趋势,导致花费了大量的人力、物力进行的监测结果不能真正发挥优化设计和及时反馈指导施工的作用<sup>[2]</sup>。

目前,国内有一些学者对信息化施工做了研究,文献[4]应用FLAC<sup>3D</sup>计算软件对深基坑-高层建筑共同作用进行三维模拟,指出建筑物的变形与支护桩体的变形密切相关,通过加强桩体强度,可以有效地减少建筑的变形,模拟计算与实测结果相符。文献[5]介绍了国内外明挖基坑施工监测系统建立的方法和标准。文献[6]指出了建立明挖基坑施工动态监测体系预警值体系的方法,为指导施工提供切实可行的依据,进而预测基坑施工中的下一步变形情况。文献[7]指出为达到信息化施工,设计及施工阶段应紧密结合,协调工作,统一部署。文献[8]根据工程实践经验,提出了一种新的明挖基坑围护结构的设计方法和新的明挖基坑的施工方法,之后结合软土地区工程实践,提出了与之适合的工程监测方法和建立适合软土地区的监测体系的方法,利用软件模拟施工全过程,预测可能的下一阶段的变形。

本文以北京地铁10号线某盾构井为工程背景,

结合施工过程,详细分析了盾构井围护结构受力变形规律。同时,根据监测结果,从理论上分析围护结构受力变形机理,并将分析结果反馈,用于指导工程施工,确保了工程的安全和稳定。

## 1 工程实例

### 1.1 工程概况

北京地铁10号线巴沟车站开挖的盾构井结构型式为现浇混凝土箱形框架结构,结构外设置外包防水层,采用明挖法施工。盾构竖井基坑长21.0 m,宽18.0 m,基坑平面呈长方形,开挖深度18.66 m。盾构井围护结构采用钻孔灌注桩加钢支撑,桩长21.5 m。为满足后续隧道盾构施工要求,在始发井边设置有一台载重能力为45 t的龙门吊,龙门吊自重136.4 t。在始发井基坑南北两侧设置东西走向龙门吊轨道,龙门吊轨道基础采用C30砼。

### 1.2 工程地质条件

根据钻探资料及室内土工试验结果,按地层沉积年代、成因类型,将本工程场地勘探范围内的上层划分为人工堆积层、新近沉积地层、第四纪全新世冲洪积层、第四纪晚更新世冲洪积层。自上而下依次是:①<sub>1</sub>杂填土;①粉土填土;④<sub>3</sub>粉细砂;⑤卵石;⑤<sub>4</sub>粉质粘土;⑥粉质粘土;⑦<sub>1</sub>细中砂;⑦卵石。各土层的岩土工程特征描述见表1。

表1 土的基本力学参数

Tab. 1 Parameters of the soil

土层名称	天然密度/(g/cm <sup>3</sup> )	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	孔隙率	压缩模量	地基承载力/kPa
① <sub>1</sub> 杂填土	1.6	8	0	0.5	-	-
① 粉土填土	1.6	8	10	0.5	-	-
④ <sub>3</sub> 粉细砂	2.02	30	0	0.38	(20)	200
⑤ 卵石	2.10	45	0	0.3	(50)	350
⑤ <sub>4</sub> 粉质粘土	2.03	12	26	0.4	5.8	220
⑥ 粉质粘土	1.92	29	16	0.46	5.4	220
⑦ <sub>1</sub> 细中砂	2.08	40	0	0.34	(40)	400
⑦ 卵石	2.15	55	0	0.3	(75)	600

### 1.3 水文地质条件

巴沟村车站无地表水。地下水主要分布层间水,含水层为卵石⑦层,水位埋深为29.5 m,水位标高为21.8 m;潜水,水位标高30.26~31.94 m,地下水主要接受大气降水,主要以蒸发及越流补给下层地下水的方式排泄。考虑到线路沿线的管道漏水及绿化灌溉等因素,不排除局部存在上层滞水。

### 1.4 盾构始发井监测方案

监测方案的制定是为了反映施工期间整个基坑的变形情况,采取在典型区域集中选取相关测试项目的原则,以达到各种测试结果、作用关系相互验证

的目的。本工程主要监测方案详述如下。

1) 桩体测斜。在基坑长、短边中点处桩体中各布置1个测斜点,共计4个测斜点,具体编号为CX1至CX4。

2) 钢支撑。根据模拟计算结果重点监测斜撑的轴力,在每层钢支撑上选择东北角和西南角的斜撑和一道对撑。

3) 钢筋笼主筋。在第37号和第10号围护桩的钢筋笼的基坑开挖侧和迎土侧的主筋上,隔一定距离(大约每隔3 m左右)安装一个钢筋应力计,一根主筋上共安装8个钢筋应力计,一根桩共安装16

个钢筋应力计。

4) 横向土压力。在第37号桩和第10号桩上迎土侧主筋外安装土压力计,在桩后隔一定距离(大约每隔3m左右)安装一个土压力计,安装在与钢筋应力计相同的水平,一根桩共安装8个土压力计,以监测基坑长边中点外侧土体横向压力的变化值。

具体监测测点布置见图1、图2及图3。

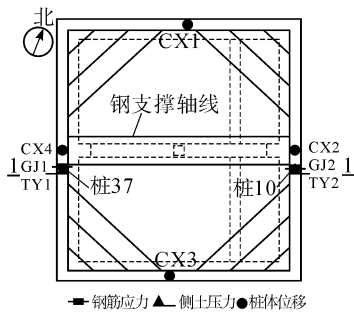


图1 基坑监测点布置图

Fig.1 Plan layout of monitoring sites of foundation pit

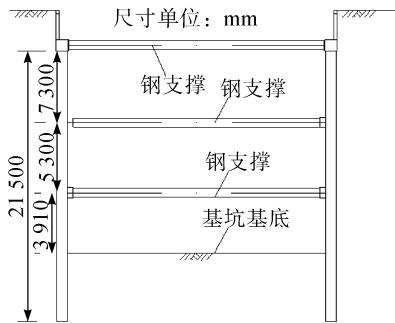


图2 基坑监测点1-1剖面布置图

Fig.2 Layout of monitoring sites of foundation pit at profile 1-1

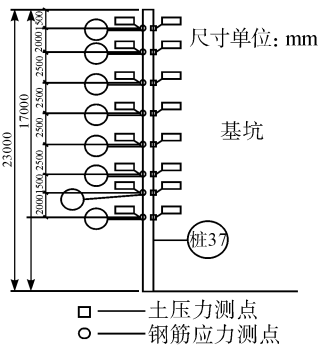


图3 桩37钢筋计和土压力计安装布置剖面图

Fig.3 Layout of the steel bar meter and earth pressure gauge of the No. 37 pile

由于CX1为盾构始发方向,为保证盾构安全,要对CX1重点监测并分析。图4为CX1围护桩桩体施工全过程的桩体水平位移图(正值表示向基坑开挖侧的水平位移,负值表示向基坑外侧的水平位移),基坑施工进度概况见表2。

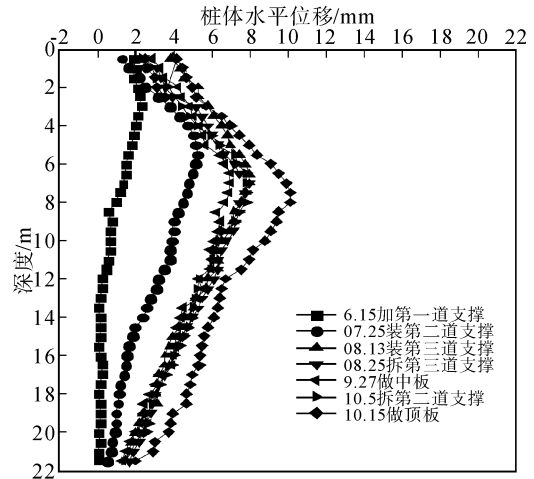


图4 各关键施工阶段CX1桩身水平位移曲线

Fig.4 Curves of horizontal displacement of pile CX1 at key stages

表2 基坑施工进度概况

Tab.2 Program of excavation

序号	时间(2009年)	施工进度概况
1	5-30 ~ 6-15	基坑开挖,施作冠梁,安装第一道钢支撑
2	6-16 ~ 7-28	继续开挖,安装第二道钢支撑
3	7-29 ~ 8-13	基坑开挖至标准深(18.66 m),安装第三道钢支撑
4	8-14 ~ 8-24	主体工程施工,拆除第三道钢支撑
5	8-25 ~ 10-22	浇筑基坑中板和顶板

图4表明,基坑开挖中围护桩的最大水平位移与开挖深度及时间密切相关,最大水平位移发生位置随钢支撑的依次安装而逐渐下移,在顶板完成后,围护桩桩体最大水平位移为10.1mm,位于距离顶板8m的位置处。基坑开挖面以上的桩体变形与施工过程及钢支撑的位置相关,桩体水平变形的大小与桩体的刚度直接相关。从桩体的水平位移来看,其最大水平位移为10.1mm,满足地铁工程监控量测技术规程(DB11/490-2007)中关于围护桩(墙)体水平位移容许值为0.15% $H$ ( $H$ 为开挖深度)或容许值为30mm(两者取最小值)的要求,说明基坑处于安全稳定状态。

## 2 监测结果分析

### 2.1 围护结构水平位移分析

围护桩的变形控制是深基坑施工过程中最关键的问题,其侧向水平变形与基坑施工过程密切相关。

### 2.2 钢支撑轴力分析

钢支撑轴力监测也是盾构井深基坑监测的一项重要内容。以东北侧角撑为例,钢支撑轴力实测数

据随时间变化曲线如图5所示。

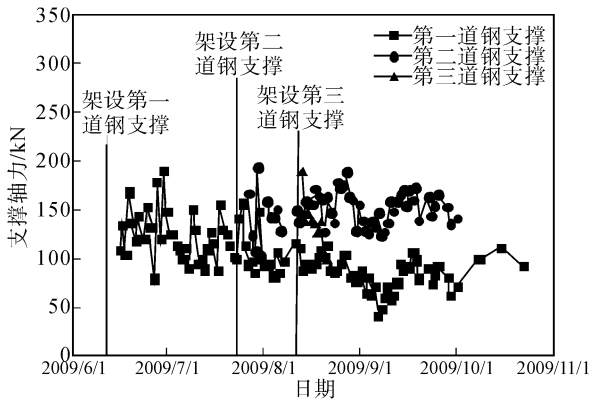


图5 东北侧钢支撑轴力变化曲线

Fig.5 Monitoring curves of axial force of northeast steel support

图5表明:①钢支撑施加预应力后的1~2天内轴力迅速上升,之后出现轴力的快速降低,反映的是桩后土体的松弛蠕变和钢支撑的预应力损失;②随着基坑开挖深度的增加,各道横支撑与土体的耦合状态趋于一致,各道横支撑轴力也基本呈现为同步变化的规律,轴力值也趋于稳定;③钢支撑轴力随开挖深度增加而增加,其大小变化与开挖方式、开挖速度等因素有关。

图5表明该基坑钢支撑轴力总体变化不大,说明钢支撑从架设到拆除过程中,受力基本稳定,这与桩体水平位移变化不大相一致。

### 2.3 围护桩桩身截面实测弯矩分析

在基坑开挖过程中,通过监测桩体前后两侧钢筋应力值的大小,来获得桩体弯矩。监测结果和计算结果如图6所示。

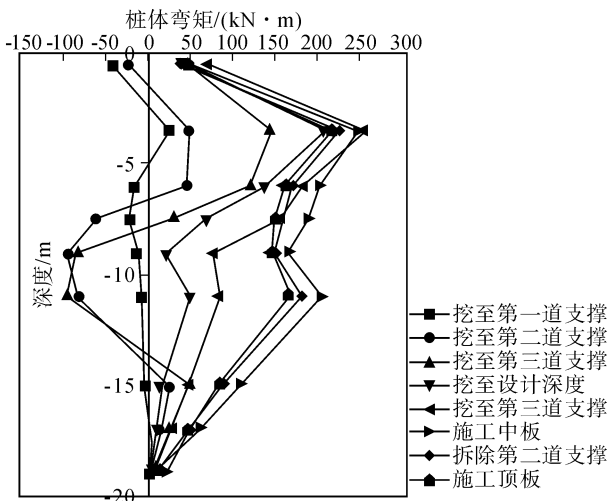


图6 各关键施工阶段桩37弯矩分布图

Fig.6 Curves of bending moment along the No.37 pile at key stages

从图6可以看出:①受冠梁的约束,桩顶弯矩基本不变。随着基坑开挖深度的增加,桩身弯矩不断增大,在不同深度,由于桩体水平位移不同,弯矩的增量也不同。桩体弯矩大体有3个反弯点,从位置上看,位于三道支撑架设的位置;②拆除第三道支撑到施工中板前后,大多数的桩身截面弯矩开始逐渐变小,说明地下结构体本身逐渐承受桩体压力;③本次监测的最大弯矩值为255.81 kN·m,约为设计值520 kN·m的50%,说明围护桩体相对变位较小,有一定的安全储备,这对盾构井和周围土体的安全稳定是非常有利的。

### 2.4 桩侧土压力分析

桩侧土压力反映土体对桩体的侧向作用力。图7为桩10侧土压力变化图。

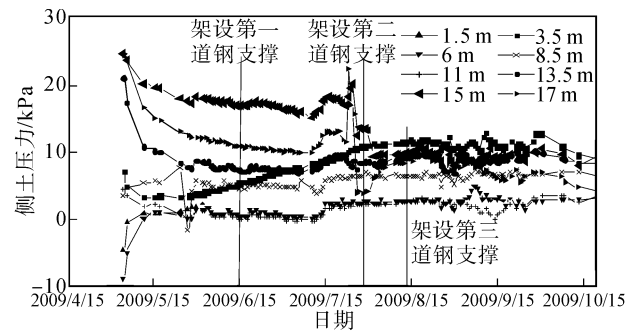


图7 桩10侧土压力变化曲线

Fig.7 Lateral earth pressures curves of No.10 pile

由图7可以看出,桩侧土压力层状分布较为明显,侧土压力随着开挖深度的增加有明显增大趋势。各土层压力在短时间内出现较大的波动,而后趋于稳定。深层测点(深度大于10m)开挖开始时侧土压力较大,在开挖进行到某一深度时,侧土压力有下降趋势,且降幅较为明显,这主要是由于对应深度处的桩体位移发生了较大变化,使得土体压力产生由静止土压力逐渐向主动土压力改变的趋势。在整个基坑施工过程中埋深1.5m处的土压力变化稳定,实测土压力与主动土压力数值变化趋势基本相同,其原因在于冠梁对桩顶有约束作用,限制了桩体的上部变形;至开挖深度达8.5m时,支护结构位移迅速增加,主动侧土压力逐渐减小,实测土压力远小于主动土压力数值;在15m及17m深度处土压力突然增大,而后减小,说明了第二道钢支撑的架设对15m以下桩后土体压力产生了较大的影响。

土压力监测结果表明实测土压力值小于主动土压力数值,这一点在埋置深度较深的测点表现得更为明显,说明土拱效应较为明显。其主要原因是朗肯理论适用的完全刚性挡土墙与桩土共同工作下的

弹性支护桩在工作机理和施工流程上有着本质的区别,这会使正常工作状态下桩内钢筋应力偏小,桩身强度远远未充分发挥,带来很大浪费;在深基坑开挖支护结构设计中,撑锚系统及入土段土体的约束,在墙后土体的压力作用下,墙体产生挠曲变形,引起土压力的重新分布,并且这一变形值要求控制在一定的范围内,以避免基坑周边设施受到破坏,因而一般不能达到主动土压力的变形范围值;另外,勘察资料提供的土体强度指标往往较保守,导致计算得出的朗肯土压力通常较大。因此,土压力的计算模式不能简单采用理论模式,而应在现场实测土压力的基础上,提出特定条件下的简单、实用的土压力计算模式。

### 3 信息化施工的实施

#### 3.1 监测结果的综合理论分析

由图4可知,围护桩体水平位移主要是向基坑内变形。基坑开挖的施工过程对桩体水平位移影响较大。在基坑开挖到一定深度,且未安装第一道钢支撑时,基坑处于暴露状态,围护桩呈现向基坑坑内变形前倾型曲线,桩顶水平位移最大;随着基坑开挖深度的增加、钢支撑的施加以及桩顶冠梁限制作用的增强,围护桩桩体水平位移变形曲线由前倾型向弓形变化,最大水平位移发生的部位随之下移。架设第一道钢支撑时,桩体嵌固深度较大,桩后土压力主要由桩体自身承担。因此,此时第一道钢支撑轴力相对增量较小(参见图5);由于受到冠梁和第一道支撑2个支反力的约束,桩体自身弯矩变化相对较小,最大弯矩仅有 $12\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,桩身2个反弯点明显,这说明冠梁和钢支撑的约束效果较好;由于桩体水平变形较小,故土体可产生的位移变化也较小,土压力变化不大。

随着开挖深度的增加,桩体的水平位移不断增加,钢支撑施加的滞后性,导致桩体在一定的部位产生了突变。同时随着开挖深度的增加,桩体最大水平位移的位置也逐渐下移。架设第二道钢支撑时,桩体嵌固深度减小,桩后土压力从桩体自身承担逐渐转移为由桩体和钢支撑共同承担。因此,此时第一道钢支撑轴力瞬时增加,而后由于第二道钢支撑的架设,第一道钢支撑轴力又有所减小;由于受到冠梁和2道钢支撑3个支反力的约束,桩体自身弯矩发生了较大的变化,最大弯矩位置下移,并且是负弯矩,处于第二道撑所在的位置,桩身出现3个反弯点,第3个反弯点位于地表下15 m左右的位置处;桩体最大水平变形处下移至8 m的位置处,故地表

下8.5 m处的土压力出现减小的情况,而在地表下15 m及地表下17 m深度处土压力突然增大,而后减小,说明了第二道钢支撑的架设对地表下15 m以下桩后土体压力产生了较大的影响,也表明第二道钢支撑对围护结构的稳定有较大的影响。

第三道钢支撑的架设使得桩体嵌固深度继续减小,桩后土压力也大部分由钢支撑承担,此时,第一、二道钢支撑轴力也有所降低。桩身出现的3个反弯点位置基本不变,但最大弯矩由埋深10 m左右的负弯矩,变为埋深3.5 m左右的正弯矩,这说明桩体弯矩又进行了一次调整,钢支撑的架设降低了桩体的最大弯矩,使得桩体的弯矩分布更为合理。桩体的水平位移略有增大,但其增加的速率已经有所降低。与桩体水平位移实测结果相对照,深层测点(深度11 m以下)侧土压力明显下降,这是由于基坑侧土压力随着基坑内土体开挖卸荷而逐渐减小,使围护结构向基坑内水平位移增大,导致桩迎土侧土压力由静止土压力转向主动土压力,使相应深度处侧土压力显著减小。

第二道钢支撑和第三道钢支撑的设计值和施加的预应力相同,但是在实际工作过程中第二道钢支撑轴力明显大于第三道钢支撑的轴力,说明第二道钢支撑的受力始终是基坑围护结构中受力最大的一部分,第三道钢支撑设计较保守。在安装有钢支撑的位置,桩身弯矩明显减小,说明钢支撑可以有效减小桩身截面弯矩。

三道钢支撑架设完成至顶板完工的时间范围内,虽然桩体水平位移有所增加,但其增加的速率明显放缓,同时也说明桩体水平变形相对施工过程有一定的滞后性;桩体弯矩、土压力都表现为逐渐减小的趋势,说明周围地层逐渐稳定,这对盾构井的安全稳定是极为有利的。

#### 3.2 监测信息的反馈

基于监测结果的综合分析,在盾构井深基坑施工过程中,向施工方提供了如下的监测信息反馈。

1) 由于第二道撑的架设使桩身出现3个反弯点,并使深度8.5 m处的土压力减小,地下15 m及17 m深度处土压力突然增大后减小的情况,可知第二道钢支撑的架设对深度15 m以下桩后土体压力产生了较大的影响,以及对基坑安全稳定影响较大,表明了第二道钢支撑是监控的重点,同时也告知施工方应保证第二道钢支撑的加载和拆除都是极为重要的施工步骤。

2) 基坑工程中的钢支撑轴力最大值出现于下一步土方开挖工序或钢支撑拆除工序中,现场监测

时加频监测本工序阶段的轴力变化,并将结果及时通知施工方,双方信息及时共享,保证基坑安全的同时,也为施工单位施工方案的制定提供参考。

3) 始发井西侧 CX1 测点位置为盾构始发方向,为保证盾构始发的安全,采用了旋喷桩进行土体加固。在土体加固过程中,对 CX1 进行加频监测,为施工方的决策提供了依据。

4) 当拆卸第三道钢支撑时,第二道钢支撑轴力逐渐增大,且桩体水平位移也继续增大,分析表明,在深基坑施工末期,钢支撑的轴力对基坑的安全稳定仍然很重要。因此,通过数据分析明确了钢支撑拆除的时机,为施工提供了可靠的数据支持,保证施工工作的安全开展。

#### 4 结 论

1) 钢支撑的架设可使桩身弯矩明显减小;第二道钢支撑的受力始终是基坑围护结构中受力最大的一部分,对盾构井深基坑的安全稳定有极为重要的作用。

2) 基坑开挖中围护桩的最大水平位移发生位置逐渐下移,在顶板完成后,围护桩桩体最大水平位移为 10.1 mm,位于距离顶板 8 m 的位置处。

3) 桩体弯矩随基坑开挖深度的增加而增大,桩体最大弯矩值远小于设计值,约为设计值的 50%;桩侧土压力层状分布较为明显,侧土压力随着开挖深度的增加有明显增大趋势。基坑开挖完成至顶板完工,桩体弯矩、土压力逐渐减小。

4) 监控量测是保证深基坑施工安全的关键。合理的监测方案、准确的监测数据以及及时的信息反馈是施工决策和信息化施工的重要保障。

#### 参考文献:

- [1] 吉华龙,邓浩,章丹峰,等. 深基坑工程监测现状和发展[J]. 建筑监督检测与造价,2008,1(2):32-35.  
Ji Hualong, Deng Hao, Zhang Danfeng, et al. State of the art and the future development of deformation monitoring during deep foundation excavation[J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2008, 1(2): 32-35.
- [2] 覃睿,唐光暹,周永泉. 基坑监测技术的现状及应用[J].

工程质量,2008,8(A):18-20,13.

Qin Rui, Tang Guangxian, Zhou Yongquan. The pit monitoring technology status and its application[J]. Engineering Quality, 2008, 8(A): 13, 18-20.

- [3] 高立新,王强,李国杰. 地铁车站深基坑变形规律现场监测[J]. 铁道工程学报,2011,(11):112-116.  
Gao Lixin, Wang Qiang, Li Guojie. In-situ monitoring of deformation laws of deep foundation pit of subway station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, (11): 112-116.
- [4] 李涛,刘波,陶龙光. 深基坑-高层建筑共同作用实例研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(2):241-245,275.  
Li Tao, Liu Bo, Tao Longguang. Interactions between deep excavations and nearby high-rise buildings[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2): 241-245, 275.
- [5] 胡春林,罗仁安,忻远跃. 高层建筑深基坑开挖施工期的监测和险情预报[J]. 岩土力学,1996,17(2):64-69.  
Hu Chunlin, Luo Renan, Xin Yuanyue. Monitoring technique and danger situation forecast during the excavation of deep foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(2): 64-69.
- [6] 杨林德,钟才根,曾进伦. 基坑支护位移和安全性监测的动态预报[J]. 土木工程学报,1999,32(2):9-13.  
Yang Linde, Zhong Caigen, Zeng Jinlun. Dynamic prediction for displacement and safety of foundation pit [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 9-13.
- [7] 陈军. 深基坑支护工程的设计、施工与监测[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2002,29(3):117-121.  
Chen Jun. Design, construction and monitor for brace engineering of deep groundwork[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2002, 29(3): 117-121.
- [8] 孙凯,许振刚,刘庭金,等. 深基坑的施工监测及其数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(2):293-298.  
Sun Kai, Xu Zhengang, Liu Tingjin, et al. Construction monitoring and numerical simulation foundation of a analysis pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 293-298.

(责任编辑 王卫勋)