

紧邻大直径盾构隧道的基坑开挖实测分析

杨子凡¹, 陈韩鑫², 罗敏敏^{2*}

(1. 中海兴业(西安)有限公司, 陕西 西安 710061; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028)

摘要: 基于杭州某紧邻大直径盾构隧道的基坑工程, 通过实测数据分析了基坑开挖过程中的变形性状规律。结果表明, 基坑开挖过程中深层土体侧移曲线呈弓形分布, 且侧移量的大小具有长边与空间效应, 开挖影响程度沿远离基坑坑角的方向逐渐衰减; 开挖工后周围地层流变和支撑应力松弛具有明显的时间效应, 扰动影响不容忽视; 周围地表沉降沿基坑向外和沿基坑长边方向均呈“凹槽”分布模式, 且基坑长边中部距基坑1.0倍开挖深度范围的地表变形沉降最大; 基坑开挖卸荷, 导致坑底土体隆起变形, 带动围护结构上移, 建议尽量缩短基坑开挖过程中的暴露时间, 尤其是深层土体, 尽快架设支撑以及浇筑底板, 可有效抑制隆起与侧向变形。

关键词: 基坑; 隧道; 变形性状; 实测分析; 时空效应; 扰动

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0067-09

Analysis of the measurements of excavation adjacent to large-diameter shield tunnel

YANG Zi-fan¹, CHEN Han-xin², LUO Min-min^{2*}

(1. Zhonghai Xingye (Xi'an) Co., Ltd., Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, Zhejiang, China)

Abstract: Based on a foundation pit project adjacent to a large-diameter shield tunnel in Hangzhou, the deformation behavior of the excavation is analyzed through measured data. The results show that the lateral displacement curve of the deep soil is in a bow-shaped distribution during the excavation. Moreover, the amount of the lateral displacement has long-side and spatial effects, and during excavation the influence gradually decreases along the direction away from the corner of the foundation pit. After the excavation, the rheology of the surrounding formation and the relaxation of the supporting stress have obvious time effects, and during exaction the influence of disturbance cannot be ignored. The surrounding ground settlement has a 'groove' distribution pattern along the outward direction and along the long side of the foundation pit. And the ground settlement in the middle part of the long side of the excavation is the largest in the range of 1.0 times the excavation depth. The unloading results in the uplift deformation of the soil at the bottom of the pit, which drives the upward movement of the retaining structure. It is recommended to minimize the exposure time during the excavation, especially for deep soils. Erection of supports and pouring of the floor as soon as possible can effectively restrain uplift and lateral deformation.

Key words: foundation pit; tunnel; deformation behavior; measurement analysis; time-space effect; disturbance

0 引言

随着城市化进程的加快, 用地紧张的问题日益严重, 地下空间的开发利用越来越多。基坑工程的周边环境趋于复杂化, 经常会出现两个甚至多个地下工程间距过近的情况, 尤其在城市隧道建设过程

中, 此类现象更是屡见不鲜^[1-2]。

现阶段, 有关基坑工程施工环境效应的影响研究中较有代表性的研究方法包括数值法^[3-4]以及现场实测分析法^[5-7]。张明远等^[4]通过有限元软件模拟了基坑动态施工全过程, 提出逆作法相对于顺作法。

施工会明显减小基坑围护结构的侧向位移与

收稿日期: 2022-01-22

作者简介: 杨子凡(1994—), 男, 陕西渭南人, 硕士, 主要从事建筑项目现场管理及施工技术研究工作。E-mail: yangiz@126.com。

*通信作者: 罗敏敏(1988—), 男, 浙江绍兴人, 博士, 主要从事岩土工程设计与岩土工程测试。E-mail: zjuominmin@163.com。

紧邻盾构隧道的水平位移。丁智等^[7]分析了邻近隧道基坑开挖全过程的深层土体侧向位移与邻近盾构隧道变形的关系,得出了土体最大水平位移与隧道变形在小范围内呈线性比例的结论。张治国等^[8]结合运营隧道以及基坑围护结构监测数据,分析了基坑不同开挖阶段周边地表沉降、地下连续墙变形等的规律和特点。杨庆光等^[9]基于影像源法,研究了基坑围护结构侧向变形引起的坑外土体侧移与沉降计算方法。程康等^[10]结合工程实测数据分析了某深大基坑开挖全过程中的地连墙隆沉及挠曲变形、地连墙墙体应力、立柱隆沉、支撑轴力、土压力、地表沉降等的发展演变规律。林之航^[11]基于监测数据,讨论了上软下硬地层中基坑开挖引起的围护结构位移、支撑轴力、立柱隆沉、地表沉降规律,并着重分析了其空间效应。

较之于数值模拟,现场实测分析更能直观反映实际工程。本文以杭州某邻近大直径盾构隧道的基坑工程为背景,根据实测数据,分析了基坑开挖过程中深层土体水平位移、支撑轴力、围护结构顶部隆沉位移、地表沉降以及地下水位和孔隙水压力的变化规律,可为今后同类型工程的设计、施工与研究提供一定的参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

江汉路站是杭州地铁6号线一期工程的中间站,车站位于杭州市滨江区江南大道与江汉路路口,沿江南大道呈东西向布置。车站附属结构包括4个出入口、1个消防疏散口和2组风亭,均为地

下一层闭合框架结构。其中2号风亭和A出入口邻近大盾构北线,采用明挖法施工,平面相对位置关系如图1所示。A出入口基坑深度10.3~13.6 m,2号风亭基坑深度10.2~12.2 m,均采用800 mm厚35.0 m深的地下连续墙结合一道混凝土支撑+两道钢支撑的围护与支护形式。A出入口地连墙距离大盾构北线最小侧向净距约2.4 m,2号风亭地连墙距离大盾构北线最小侧向净距约1.7 m,相对位置关系剖面如图1所示。

由于盾构隧道距离基坑很近,因此在基坑底部一定深度范围内采取了旋喷桩坑底加固措施。

1.2 工程地质与水文条件

车站附属结构基坑开挖深度范围内的土层主要为砂质粉土、砂质粉土夹粉砂、粉砂和淤泥质粉质黏土。孔隙性潜水主要赋存于场区表层的填土、砂质粉土、粉砂中;孔隙承压水分布于场区下部的粉砂和圆砾,水量较丰富;隔水层为场区上部的淤泥质土和黏土层;基岩裂隙水主要赋存于场区深部的风化基岩中。主要地层分布情况如图2所示。

1.3 基坑施工工况

本次基坑开挖之前,大直径盾构隧道已施工完成,且前后施工间隔较短。考虑到大盾构施工已对车站基坑周围土体造成了一定扰动,为避免多次扰动影响,减小车站附属结构基坑开挖对大盾构隧道的影响,基坑采用分层、分段、对称、限时开挖,遵循“先撑后挖、限时支撑、分层开挖、严禁超挖”的原则,尽量减少基坑无支撑暴露时间和空间。方案如下:A出入口分成东西两段分区、分层开挖,2号风亭整体分层开挖。施工工况详见表1。

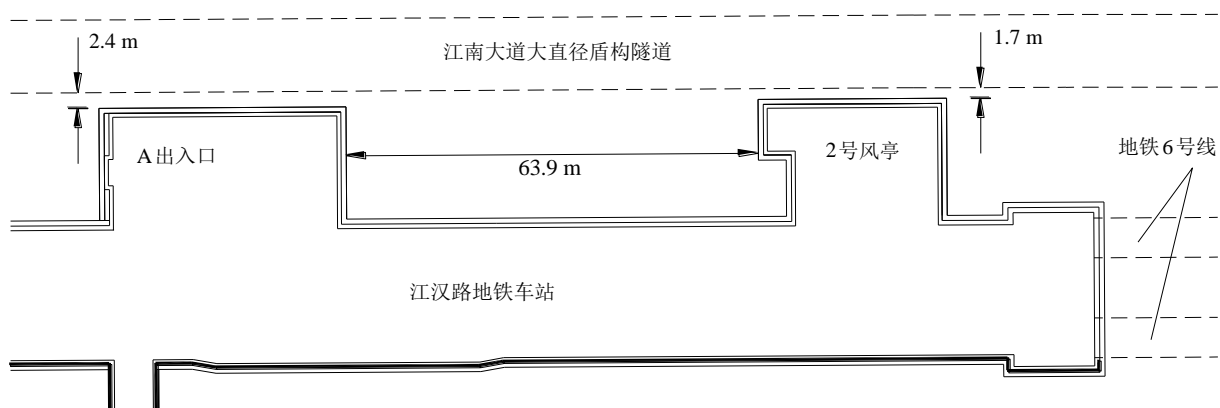


图1 车站附属结构与大盾构隧道的平面位置关系

Fig. 1 Layout of the station ancillary structure and the shield tunnel

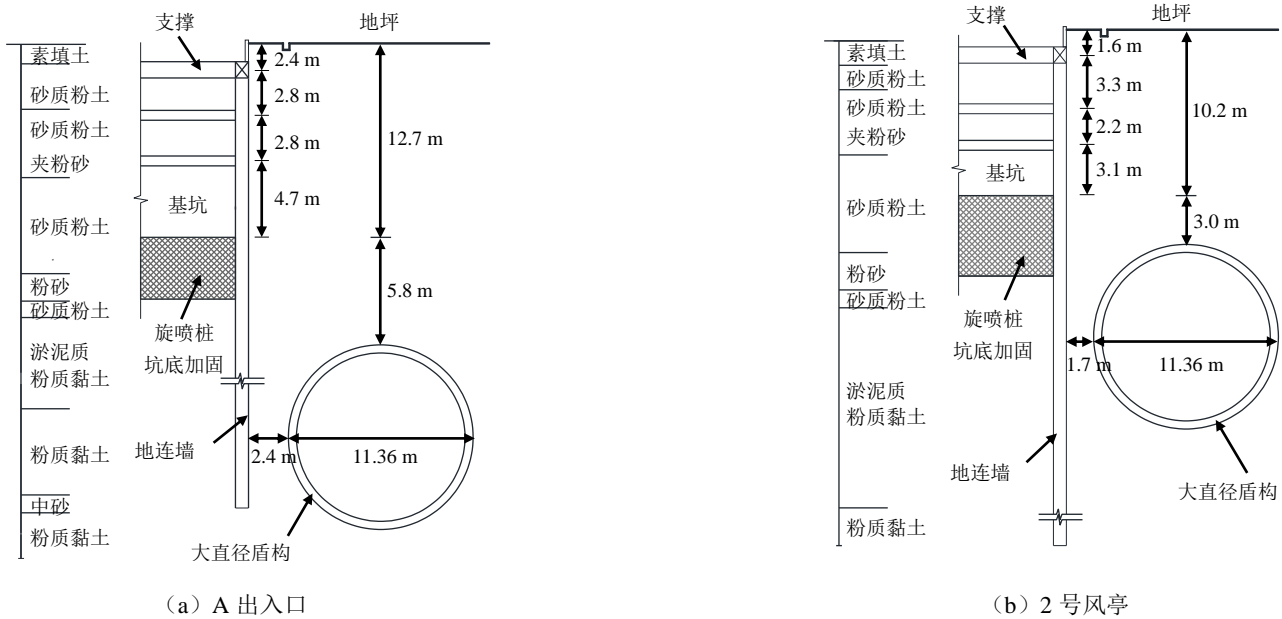


图 2 车站附属结构与大盾构隧道的剖面位置关系

Fig. 2 Cross section of the station auxiliary structure and the shield tunnel

表 1 施工工况

Table 1 Construction conditions

工况	工况说明
1	A 出入口东半侧第一层土开挖, 架设钢支撑
2	A 出入口西半侧第一层土开挖, 钢支撑斜支座安装; 东半侧斜撑架设
3	A 出入口西半侧斜撑架设, 2 号风亭第一层土方开挖
4	A 出入口第二层土分区开挖
5	A 出入口钢支撑架设
6	A 出入口第三层土分区开挖, 底板浇筑, 2 号风亭钢支撑架设
7	2 号风亭最后一层土开挖
8	2 号风亭浇筑底板

1.4 监测方案

本文主要针对 A 出入口基坑进行分析, 监测点位分布如图 3 所示, 监测项目主要包括: 深层土体水平位移、围护结构墙顶竖向位移、支撑轴力、基坑周边地表沉降和孔隙水压力等。根据相关规范、江汉路站附属基坑围护设计图纸以及地铁集团相

关管理办法, 结合本工程自身特点、周边环境的实际情况和已有的工程经验, 确定了本基坑工程各监测点数量及预警值, 如表 2 所示。地表沉降与围护结构顶部竖向位移的测量精度为 0.1 mm, 深层土体水平位移的测量精度为 0.01 mm。

表 2 基坑监测控制值

Table 2 Monitoring control values of the foundation pit

序号	监测项目	测点数量	黄色预警	橙色预警	红色预警
1	深层土体水平位移	5	±20.4 mm	±24.0 mm	±30.0 mm
2	轴力值 (混凝土支撑)	9	3 264.0 kN	3 840.0 kN	4 800.0 kN
3	围护结构墙顶竖向位移	11	±13.6 mm	±16.0 mm	±20.0 mm
4	基坑周边地表沉降	44	±17.0 mm	±20.0 mm	±30.0 mm
5	地下水位变化量	6	±800 mm	±1 000 mm	±2 000 mm
6	孔隙水压力	6	—	—	—

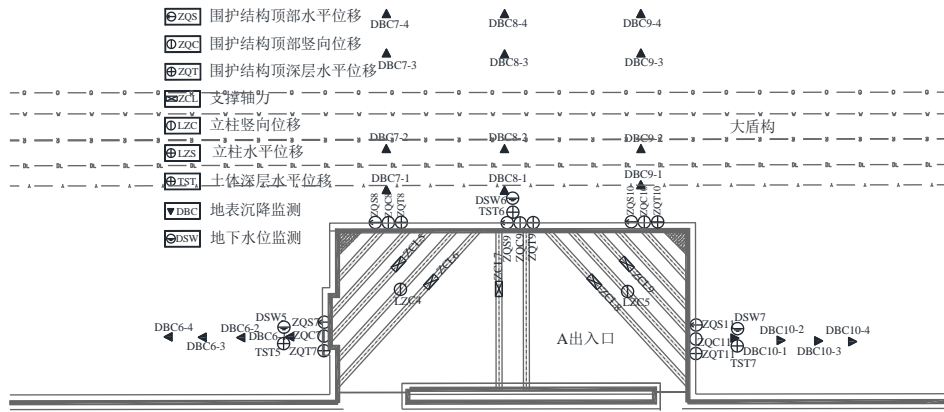
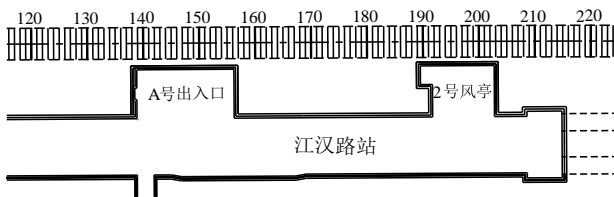


图3 基坑周围监测点布置图

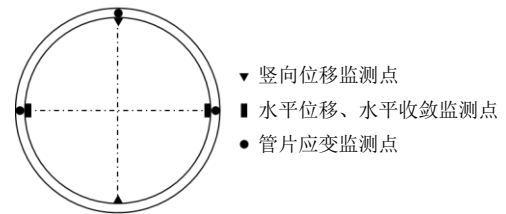
Fig. 3 Layout of monitoring points around the foundation pit

盾构隧道变形监测范围为 130~155 环，每 5 环一个断面，进行竖向位移、水平位移及水平收敛监测，隧道管片环号与基坑位置关系、隧道断面各监测点布置如图 4 所示。盾构隧道 136、138、145、147、153 及 155 环设置管片应变监测点，每环管片

在环向对应 3 点钟、9 点钟及 12 点钟方向分别设置管片应变监测点，监测点要求由两个垂直的应变片组成，靠近环缝位置设置。其中 136、138 环靠近东侧环缝设置，145、147、153 及 155 环靠近西侧环缝设置。隧道监测控制值如表 3 所示。



(a) 隧道平面监测环号布置图



(b) 隧道断面监测点布置图

图4 隧道监测点布置图

Fig. 4 Layout of monitoring points around the tunnel

表3 隧道监测控制值

Table 3 Monitoring control values of the tunnel

序号	监测项目	日报警值	累计报警值	控制值
1	拱顶(底)竖向位移	±3 mm	±21 mm	±25 mm
2	净空收敛	±2 mm	±21 mm	±25 mm

2 监测结果分析

2.1 深层土体水平位移

根据监测点布置图，分别选取 A 出入口基坑短边、长边边角与长边中部 3 处测点进行分析，编号分别为 ZQT7、ZQT8 和 ZQT9。深层土体水平位移随时间变化如图 5 所示，图中正值表示向坑内移动。

由图 5 可知，基坑开挖引起的侧向变形，沿深度方向的分布规律总体上表现为“两端小、中间大”的弓形，深层土体水平位移的最大值出现在坑底开挖面附近，与丁智等^[12]的统计规律结果一致。随着基坑开挖深度的增加，基坑侧向变形增加，“弓形”更加明显；且 A 出入口第三层土方开挖引起的侧向

变形远大于前两层开挖，具有明显的深度效应。这是因为深层开挖比浅层开挖产生更大的应力卸荷，使得基坑产生更为显著的变形。

对比图中各测点的水平位移曲线，可以看出，ZQT7 测点的深层土体水平位移要明显小于 ZQT8 与 ZQT9 测点，即基坑短边的深层土体水平位移要小于基坑长边，基坑边角处深层土体水平位移（ZQT8）要小于基坑中部（ZQT9）。究其原因，是由基坑的长边效应和空间效应所致。基坑的开挖过程中，围护结构的较大侧移一般发生在基坑的长边，且为跨中部位，短边位移相对较小，尤其基坑端部的拐角部位处位移最小^[13]。

对比工况 6 与工况 7，发现 2 号风亭深层土体开挖引起了 A 出入口基坑长边侧向变形的明显增

加, 原因可能在于: 2 号风亭基坑坑底与大直径盾构隧道比较接近, 基坑深层开挖引起大直径盾构隧道向基坑一侧的较大水平位移; 由于大直径盾构隧道具有较大的整体刚度, 隧道变形在一定影响范围内具有连续性, 从而导致距离 2 号风亭位置不远处

的 A 出入口位置的盾构隧道也存在向基坑一侧的较大水平位移。由于盾构隧道向基坑一侧挤压, 从而导致基坑侧向变形明显增加, 说明由于大直径盾构隧道的近距离存在, 使得平行基坑相互之间的开挖影响关系变得更为复杂。

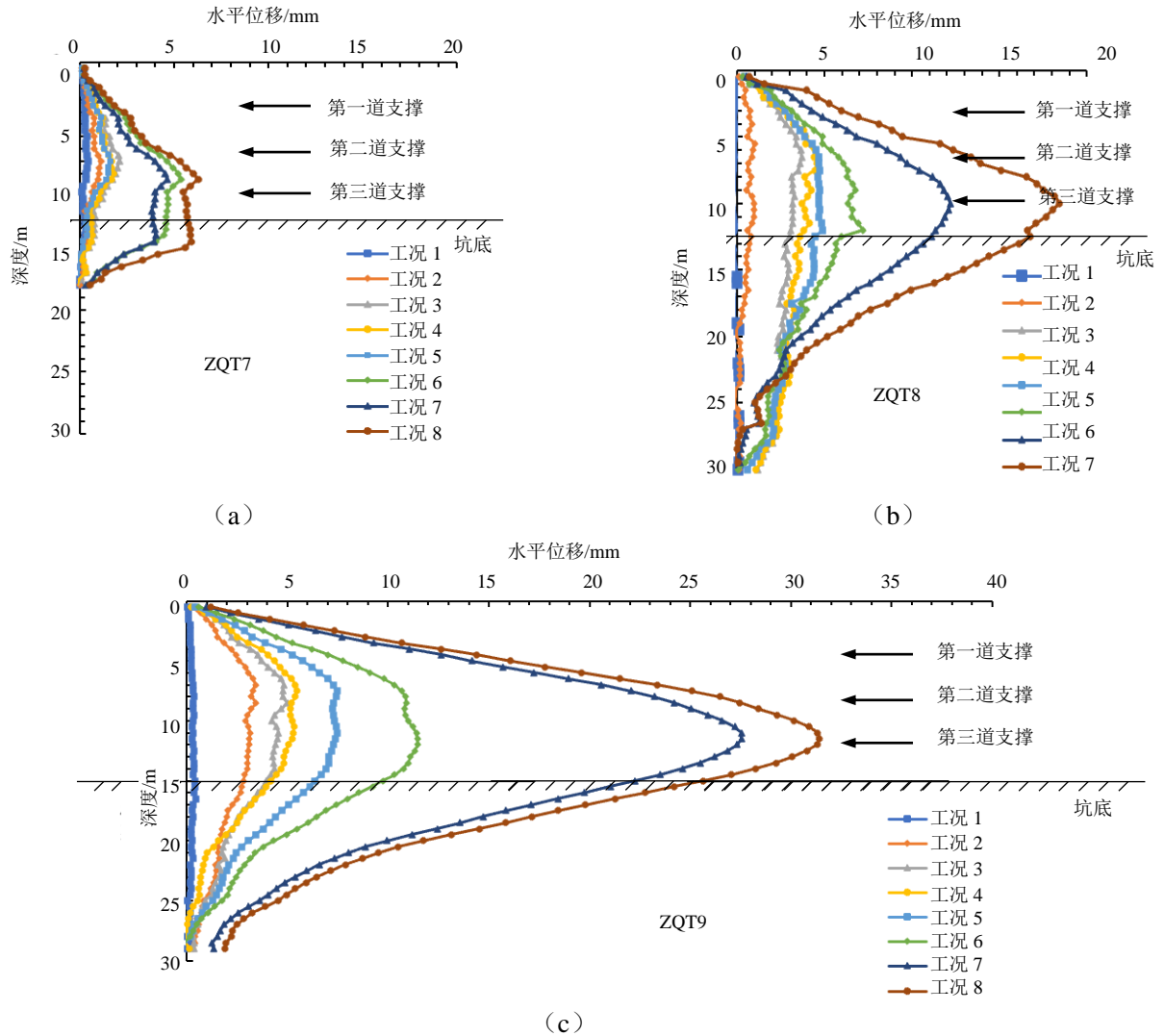


图 5 深层土体水平位移曲线
Fig. 5 Horizontal displacement of the soil

2.2 围护结构顶部位移

围护结构顶部的竖向位移如图 6 所示, 正值表示上抬, 负值表示下沉。因为基坑开挖过程中, 坑底土体的隆起或沉降变形难以观测, 而土体的隆起或沉降一定程度上会带动围护结构的上升或下沉, 所以围护结构顶部的竖向位移可以较好反应坑底土体的竖向变形。由图可知, 基坑开挖过程中, 围护结构变形以上抬为主, 可以理解为基坑开挖卸荷致使坑底土体隆起, 该隆起值最大达到 4 mm 左右, 且与开挖深度大致成递增变化。随着基坑开挖结束, 底板浇筑后围护结构出现明显下沉, 这是因为底板浇筑过程中, 支撑和底板的重力平衡了围护结构的负摩阻力, 使测点隆

起减小甚至出现沉降。

结合监测点布置图, 从各测点的变形数值分布来看, 位于基坑西边角的测点 ZQC7 竖向位移最小, 而位于基坑长边中部的测点 ZQC9 竖向位移最大。由于东侧 2 号风亭基坑的开挖影响, 位于 A 出入口基坑东侧的测点 ZQC10 和 ZQC11 也出现了较大竖向变形, 尤其是在 2 号风亭基坑开挖过程中。显然, 基坑开挖变形性状与其开挖长边效应以及邻近施工影响有很大关系。

2.3 支撑轴力

第一层混凝土支撑轴力变化曲线如图 7 所示, ZCL5、ZCL6、ZCL8、ZCL9 所测均为斜撑轴力,

ZCL7 所测为横撑轴力。从图中可以看出，随着基坑的开挖卸荷，围护结构在侧向压力作用下向坑内移动，其中一部分力传递到支撑上，导致支撑轴向压力增加。即第二道支撑架设前，第一层混凝土支撑轴力明显增大，但随着第二道支撑的架设，第二道支撑开始受力，第一道支撑的轴力开始减小，直至底板浇筑，支撑轴力达到第一个低值，随后支撑轴力却有较大的反弹。究其原因，在于基坑明挖顺筑法的支护结构从下往上拆除，当第二、第三道支撑拆除时造成第一道支撑轴力出现了较大的波动。而且可以发现，受空间效应的影响，跨中横撑所受的轴力要明显大于斜撑。

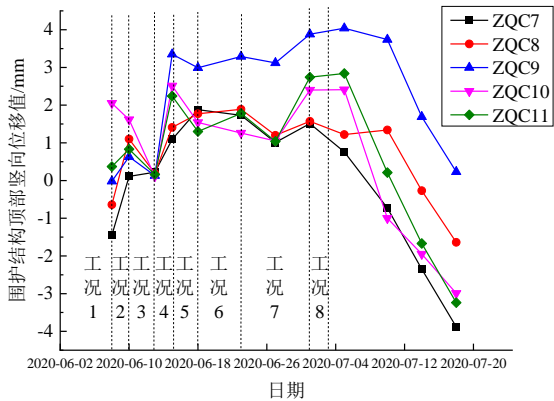


图 6 围护结构顶部竖向位移曲线

Fig. 6 Vertical displacement at the top of the enclosure structure

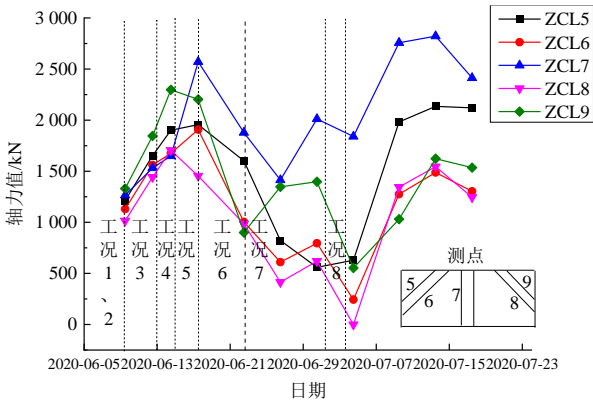


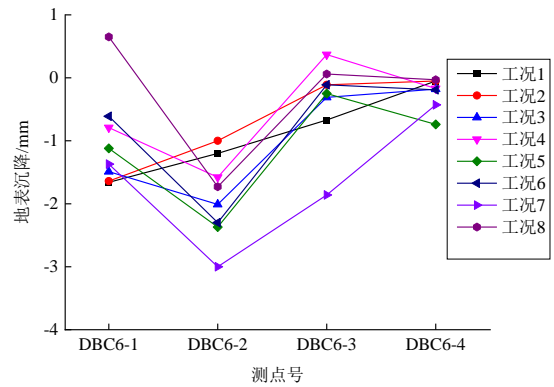
图 7 混凝土支撑轴力变化曲线

Fig. 7 Axial force variation of the concrete support

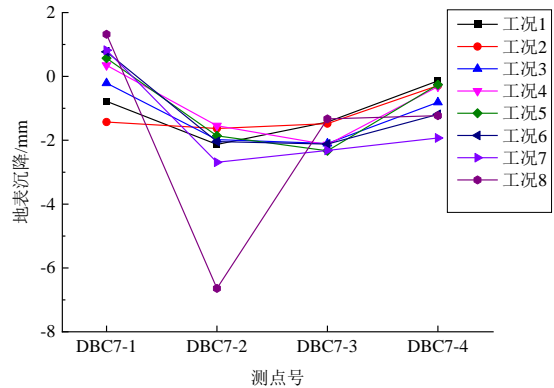
2.4 地表沉降

基坑周围地表沉降变化曲线如图 8 所示，正值表示隆起，负值表示沉降。结合监测点布置图，取 DBC6、DBC7、DBC8 三组测点分析，可知坑外地表总体表现为沉降趋势，且相对而言，每一组的 2 号测点处沉降量是 4 个测点里最大的，约为距离基坑 10 m 位置处，即地表沉降约在 1.0 倍的基坑开挖深度处达到最大值，与文献^[13]中的监测结果较为一致。从该点位置往两边，地表沉降量均减小，基

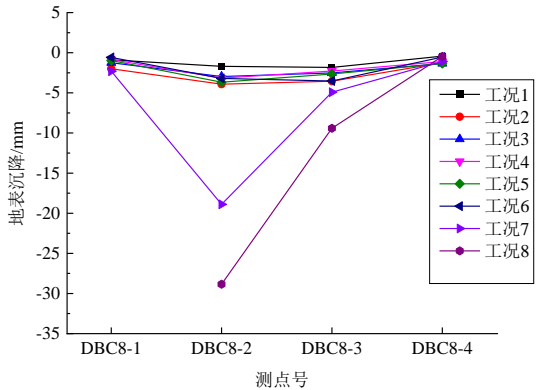
坑周边地表沉降沿基坑向外呈“凹槽”形分布，这与张治国等^[8]和林志斌等^[14]的结论相吻合，表明围护结构和加固措施可以有效控制土体沉降。



(a) DBC6



(b) DBC7



(c) DBC8

图 8 周围土体地表沉降变化曲线

Fig. 8 Ground settlement of soil around foundation pit

此外，对比 DBC6、DBC7、DBC8 三组测点，可以发现，位于基坑短边处的 DBC6 组测点处地表沉降量要小于长边处地表沉降量，位于基坑长边坑角处的 DBC7 组测点地表沉降量要明显小于长边中部处地表沉降量。沿基坑长边方向周边地表也呈“凹槽”形分布。因此，可以推断基坑长边中部距基坑 1.0 倍开挖深度范围的地表沉降值理论上应为周边地表变形的最大值。

2.5 地下水位与孔隙水压力

基坑开挖过程中，地下水是影响基坑稳定性的重要因素，大多基坑失稳都与地下水密切相关，若不处理好地下水问题将会发生流沙、管涌、突涌等现象。本工程中地下水位变化曲线如图 9 所示，正值表示上升，负值表示下降。从图中可以看出，基坑开挖阶段地下水位变化量较大，开挖完成后逐渐趋于稳定，其中 DSW5 测点处开挖阶段地下水位变化量较大，6 月 10 日达到红色预警值，DSW7 测点处地下水位变化量总体较大，在施工阶段应引起足够重视。

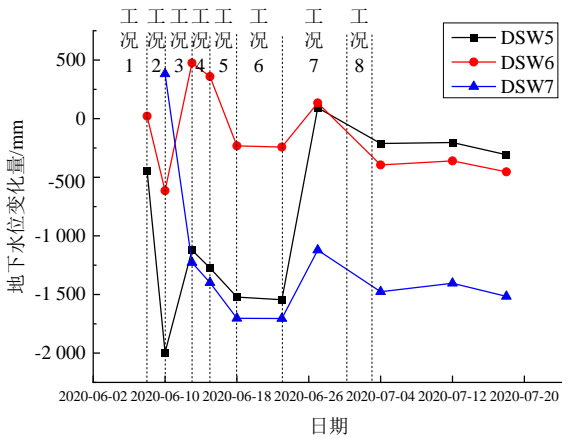


图 9 地下水位变化曲线

Fig. 9 Variation of groundwater level

基坑开挖过程中，孔隙水压力的变化可以反映周围土体渗流场与应力场的变化，从而反映围护结构的隔水性能，是衡量围护结构稳定性与基坑安全性的重要指标。孔隙水压力变化曲线如图 10 所示，在前两层土方开挖过程中，孔隙水压力有一个略微增大的过程，但随着第三层土方开挖，孔隙水压力出现较大的回落，随后再逐步恢复正常水平。结合李允忠等^[15]的研究，孔隙水压力的降低主要是由基坑开挖后的水头差引起的。因为在基坑施工过程中，基坑内外的水头差较大，地下水从基坑外流入基坑内，致使基坑外孔隙水压力降低。

2.6 隧道变形

图 11 所示为沿大直径盾构隧道纵向分布的最大水平位移，正值表示远离基坑方向，负值表示朝向基坑方向。由图可知，基坑开挖引起大直径盾构隧道向基坑方向产生一定的水平位移，且位于基坑中部的隧道侧移量大于两侧的变形，这是由于基坑中部的应力集中所导致的。盾构隧道的最大水平位移发生在 140 环，约 4.5 mm，整体曲线稍向西偏移。这是因为 A 出入口基坑分区自东向西开挖，先开挖区的土体位移场和应力场随着开挖向东逐渐叠加至西侧的后开挖区，导致最大变形发生在基坑开挖的后挖区块内，这

与丁智等^[7]和陈仁朋等^[16]的研究结果相似。

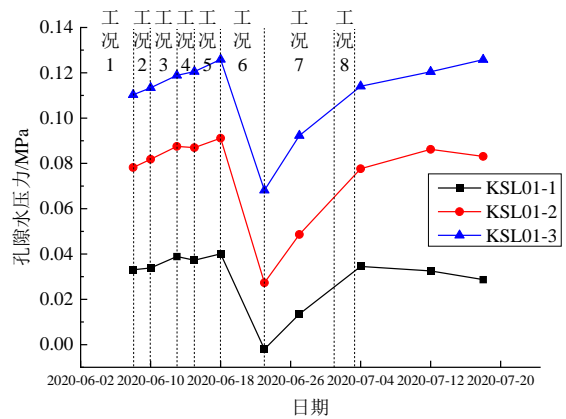


图 10 孔隙水压力变化曲线

Fig. 10 Variation of pore water pressure

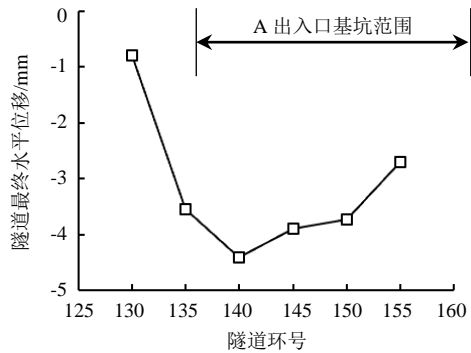


图 11 沿隧道纵向分布的隧道最大水平位移图

Fig. 11 Maximum horizontal displacement of the tunnel along the longitudinal direction of the tunnel

图 12 所示为隧道管片环向应变的变化图，可知管片拱顶为负应变，管片右拱腰侧基本为负向应变，而左拱腰侧基本为正向应变，表明管片受到了侧向不平衡力作用，与“斜鸭蛋”式收敛变形时的管片状态一致。特别地，153 环位置处的管片 3 点钟方向应变、9 点钟方向应变均较大，应重点关注。

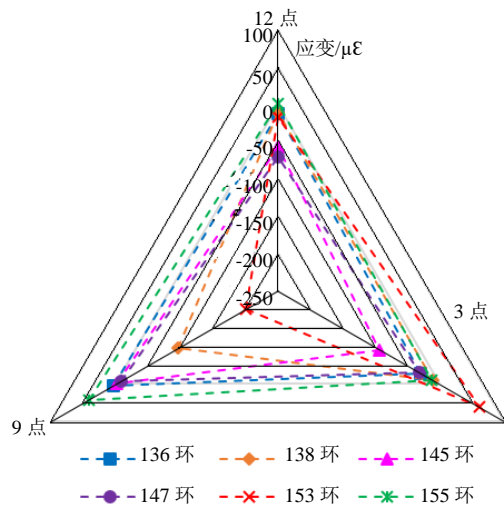


图 12 隧道管片环向应变图

Fig. 12 Circumferential strain diagram of tunnel segment

3 结论

本文基于实测数据,研究了邻近大直径盾构隧道的基坑开挖变形性状影响,分析了施工过程中深层土体水平位移、支撑轴力、围护结构顶部隆沉位移、地表沉降以及地下水位和孔隙水压力的变化规律,得到如下结论:

(1) 基坑开挖过程中,深层土体与围护结构明显向坑内移动,形成类似弓形的侧移曲线,且侧移量的大小具有长边与空间效应,即基坑短边位移相对基坑长边中部较小,开挖影响程度沿远离基坑坑角的方向逐渐衰减。

(2) 基坑开挖后周围土层产生的流变和支撑的应力松弛具有明显的时间效应,工后影响不容忽视。开挖至第二层土方以及拆除支撑时,第一道混凝土支撑的轴力波动较大。建议尽量缩短基坑开挖过程中的暴露时间,尤其是深层土体,尽快架设支撑以及浇筑底板,降低开挖期间的扰动影响。

(3) 随着基坑开挖卸载,坑底土体产生隆起变形,带动围护结构上移,而底板浇筑的重力平衡了围护结构的负摩阻力,导致隆起减小甚至出现沉降。

(4) 基坑周围地表沉降沿基坑向外和沿基坑长边方向均呈“凹槽”分布模式,且基坑长边中部距基坑 1.0 倍开挖深度范围的地表沉降值理论上应为周边地表变形的最大值位置。

(5) 基坑开挖期间的地下水位变化量较大,随后趋于稳定。基坑开挖引起的水头差会导致孔隙水压力变化,且深层土体开挖造成的影响明显大于浅层土体。

(6) 基坑开挖导致位于基坑侧下方的盾构隧道产生朝向基坑的水平位移,其沿隧道纵向的变形分布规律与分区开挖顺序有关,最大变形出现在基坑后开挖的区域范围内。隧道管片环向变形呈现为“斜鸭蛋”形。

参考文献

[1] 郑刚,朱合华,刘新荣,等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 1-24.
ZHENG Gang, ZHU He-hua, LIU Xin-rong, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1-24.

[2] 丁智,张霄,梁发云,等. 软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 50-70.
DING Zhi, ZHANG Xiao, LIANG Fa-yun, et al.

Research and prospects regarding the effect of foundation pit excavation on an adjacent existing tunnel in soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 50-70.

[3] GUO P, GONG X, WANG Y. Displacement and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113(9): 103102.

[4] 张明远,杨小平,刘庭金. 临近地铁隧道的基坑施工方案对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1203-1208.
ZHANG Ming-yuan, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin. Comparative analysis of construction schemes for foundation pit excavation adjacent to subway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1203-1208.

[5] 康志军,黄润秋,卫彬,等. 上海软土地区某逆作法地铁深基坑变形[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(8): 1527-1536.
KANG Zhi-jun, HUANG Run-qiu, WEI Bin, et al. Deformation behaviors of deep top-down metro excavation in Shanghai soft clay[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(8): 1527-1536.

[6] GUI Y, ZHAO Z X, QIN X Q, et al. Study on deformation law of deep foundation pit with the top-down method and its influence on adjacent subway tunnel[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 8: 1-15.

[7] 丁智,张霄,金杰克,等. 基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 415-423.
DING Zhi, ZHANG Xiao, JIN Jie-ke, et al. Measurement analysis on whole excavation of foundation pit and deformation of adjacent metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 415-423.

[8] 张治国,白乔木,姜蕴娟,等. 邻近隧道及周围地层受深基坑开挖影响的现场监测研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 177-184.
ZHANG Zhi-guo, BAI Qiao-mu, JIANG Yun-juan, et al. In-situ monitoring analyses of the influences of deep foundation pit excavation on adjacent metro tunnels and surrounding strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 177-184.

[9] 杨庆光,梁凌川,柳雄,等. 基坑围护结构侧向变形引起的坑外土体变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 915-920.
YANG Qing-guang, LIANG Ling-chuan, LIU Xiong, et al. Analysis on soil movements for lateral deformation of retaining wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(3): 915-920.

- [10] 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 Ri-qing, YING Hong-wei, 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.
- [11] 林之航. 上软下硬深基坑变形规律与空间效应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1792-1800.
LIN Zhi-hang. Research on deformation and spatial effect of upper-soft and lower-hard deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1792-1800.
- [12] 丁智, 王达, 王金艳, 等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 506-512.
DING Zhi, WANG Da, WANG Jin-yan, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 506-512.
- [13] 奚家米, 付垒. 基于时空效应的深基坑工程变形规律分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16): 290-297.
XI Jia-mi, FU Lei. Analysis of deformation law of deep foundation pit based on space-time effect[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(16): 290-297.
- [14] 林志斌, 李元海, 刘继强. 软土基坑变形时空演化规律研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 82-90, 97.
LIN Zhi-bin, LI Yuan-hai, LIU Ji-qiang. A study on the spatial-temporal evolution regularity of the deformation of a foundation pit in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 82-90, 97.
- [15] 李允忠, 汪稔. 基坑开挖孔隙水压力变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 813-816, 820.
LI Yun-zhong, WANG Ren. Experimental research on law of pore water pressure during foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 813-816, 820.
- [16] 陈仁朋, 孟凡衍, 李忠超, 等. 邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2016, 50(5): 856-863.
CHEN Ren-peng, MENG Fan-yan, LI Zhong-chao, et al. Considerable displacement and protective measures for metro tunnels adjacent deep excavation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2016, 50(5): 856-863.



(上接第 48 页)

- WANG Si-xin, QU Na. Dealing with the problem of sloping building basement's anti-uplift with green technological methods[J]. Architecture Technology, 2012, 43(10): 925-928.
- [3] 徐泽友, 蒋洪涛. 地下工程抗浮设计[J]. 江苏建筑, 2011(2): 34-36.
XU Ze-you, JIANG Hong-tao. Anti-floating design of underground building[J]. Jiangsu Construction, 2011(2): 34-36.
- [4] 中华人民共和国行业标准. 建筑工程抗浮技术标准: JGJ 476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Industry Standard of the People's Republic of China. Technical Standard for Building Engineering Against Uplift: JGJ 476—2019[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2019.
- [5] 曹洪, 潘泓, 骆冠勇. 地下结构截排减压抗浮概念及运用[J]. 岩土力学与工程学报, 2016, 35(12): 2542-2548.
CAO Hong, PAN Hong, LUO Guan-yong. A new anti-floatation method by drainage: concept and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2542-2548.
- [6] 袁帮玉, 安鹏. 地下室泄水减压抗浮体系应用初探[J]. 城市建筑, 2019, 16(9): 145-146.
YUAN Bang-yu, AN Peng. Preliminary study on the application of dewatering and anti-floating system in basement[J]. Urbanism and Architecture, 2019, 16(9): 145-146.
- [7] 牛梦娇. “抗排”结合的地下工程抗浮关键技术研究[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2018.
NIU Meng-jiao. Research on anti-floating key technology of underground engineering combined with “structural anti-floating and drainage”[D]. Qingdao, Shandong: Qingdao University of Technology, 2018.
- [8] 中华人民共和国电力行业标准编写组. 碾压式土石坝设计规范: DL/T 5395—2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Power Industry Standard Compilation Group of People's Republic of China. Design Code for Rolled Earth-rock Fill Dams: DL/T 5395—2007[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [9] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
CHEN Xi-zhe. Soil Mechanics Foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [10] 彭士标. 水力发电工程地质手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
PENG Tu-biao. Handbook of Hydropower Engineering Geology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011.