

DOI: 10.11779/CJGE202105003

# 基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析

许四法<sup>1</sup>, 周奇辉<sup>2</sup>, 郑文豪<sup>3</sup>, 朱永强<sup>2</sup>, 王哲<sup>\*1</sup>

(1. 浙江工业大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310023; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;  
3. 浙江国联建设有限公司, 浙江 杭州 310052)

**摘要:** 既有运营地铁隧道因邻近基坑施工发生变形, 对地铁隧道正常使用和安全运营带来不利影响。根据基坑施工期间邻近运营地铁隧道变形监测数据, 对隧道变形从基坑围护结构施工开始至开挖结束进行了全过程分析。研究结果发现: TRD 施工对邻近隧道存在挤土作用, 隧道呈现“水平收缩, 竖向拉伸”变形模式; 三轴水泥搅拌桩施工引起隧道向基坑方向位移; 地下连续墙施工对邻近隧道相当于侧向卸荷作用, 隧道呈现“水平拉伸, 竖向收缩”变形模式。围护结构与基坑开挖施工间隙产生的道床沉降量占总道床沉降量比例最大, 达到了 70.24%; 隧道水平位移在围护结构施工阶段增加量最为突出, 占总水平位移量 43.81%; 隧道收敛在基坑开挖阶段增加量最大, 占总隧道收敛量的 55.26%。建议类似工程根据隧道变形发展规律, 制定不同施工阶段变形控制措施, 使邻近隧道各项变形处于安全、可控范围。

**关键词:** 基坑施工; 隧道; 围护结构; 基坑开挖; 全过程分析

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0804-09

作者简介: 许四法(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事基础工程和环境岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: xusifa@zjut.edu.cn。

## Influences of construction of foundation pits on deformation of adjacent operating tunnels in whole process based on monitoring data

XU Si-fa<sup>1</sup>, ZHOU Qi-hui<sup>2</sup>, ZHENG Wen-hao<sup>3</sup>, ZHU Yong-qiang<sup>2</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Powerchina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 3. Zhejiang Guolian Construction Corporation Limited, Hangzhou 310052, China)

**Abstract:** Due to the deformation of operating subway tunnels near foundation pit, the normal use and safe operation of subway tunnels are adversely affected. Based on the monitoring data of deformation of a subway tunnel near operation during the construction of foundation pits, the whole process of tunnel deformation from the envelope construction of foundation pits to the end of excavation is analyzed. The results show that the TRD construction has a soil-squeezing effect on the adjacent tunnel, and the tunnel presents a deformation mode of "horizontal contraction and vertical stretch". The displacement of the tunnel towards the foundation pit is caused by the construction of three-axis cement mixing pile. The construction of underground diaphragm wall is equivalent to the unloading effect on the adjacent tunnel, and the tunnel presents the deformation mode of "horizontal stretching, vertical contraction". The settlement of ballast bed generated by the gap between enclosure structures and excavation of the foundation pit accounts for the largest proportion of the total ballast bed settlement, reaching 70.24%. The increment of horizontal displacement of the tunnel is the most prominent in the construction stage of the envelope, accounting for 43.81% of the total horizontal displacement. The increment of tunnel convergence is the largest in the excavation stage of the foundation pit, accounting for 55.26% of the total tunnel convergence. It is suggested that the deformation control measures at different construction stages should be formulated according to the development law of tunnel deformation in similar projects, so that the deformation of the adjacent tunnels can be in a safe and controllable range.

**Key words:** construction of foundation pit; operating tunnel; construction of envelope; excavation; whole process analysis

## 0 引言

由于城市建设需要, 不可避免在既有运营隧道附近进行基坑施工, 如广州市某商住楼基坑支护外边线

与东侧区间隧道间的最小水平净距为 12.50 m<sup>[1]</sup>; 杭州

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778585)

收稿日期: 2020-07-06

\*通信作者 (E-mail: wangzsd@zjut.edu.cn)

某大型深基坑围护结构边线距离杭州地铁2号线基坑隧道最近约9.5 m<sup>[2]</sup>; 上海市裕年国际商务大厦基坑围护结构与轨道交通1号线区间隧道净距约7.2 m<sup>[3]</sup>。基坑施工会破坏运营隧道与周边土体之间原有平衡状态, 使运营隧道受到附加应力作用产生变形。2013年宁波市地铁一号线一区间隧道由于邻近基坑挖土顺序不当、水平支撑架设不及时以及周边车辆动荷载作用出现多处纵向裂缝, 并出现少量渗水现象<sup>[4]</sup>。国家行业规范《城市轨道交通结构安全保护技术规范》对地铁隧道变形控制提出了严格的标准, 以杭州市轨道交通结构安全状况为Ⅱ类为例, 要求盾构隧道累计水平位移小于8 mm, 累计竖向位移小于10 mm, 累计相对收敛小于8 mm。

基坑施工对邻近运营隧道的影响, 不少学者进行了研究, 主要分为围护结构施工阶段<sup>[5-9]</sup>与基坑开挖阶段<sup>[10-14]</sup>。文新伦<sup>[15]</sup>、朱蕾<sup>[16]</sup>、王占生等<sup>[17]</sup>研究了SMW工法水泥土搅拌桩施工期间相邻隧道的变形规律, 发现注入浆液会产生挤压效应; 况龙川<sup>[18]</sup>分析了灌注桩、地下连续墙施工以及基坑开挖引起旁侧隧道竖向位移、弦向变形、侧移变化, 发现灌注桩、地下连续墙施工会使隧道产生沉降, 基坑开挖会使隧道发生明显侧移; Chen等<sup>[19]</sup>分析发现, 软土地层大型基坑开挖不同阶段对隧道有不同程度的影响, 且时间效应明显; 王立峰等<sup>[20]</sup>依据基坑开挖阶段隧道监测数据, 提出了估算地铁隧道变形的拟合多项式; Liu等<sup>[21]</sup>研究了基坑开挖对既有隧道的影响, 结果表明隧道沉降、水平位移和直径收敛的演变可分为缓慢增长阶段、快速增长阶段和稳定增长阶段, 此外采取微扰注浆能较好地修正相邻开挖引起的附加变形; Shi等<sup>[22]</sup>发现盾构隧道侧向开挖过程中的卸荷, 使盾构隧道断面产生竖向收敛和向基坑水平位移; 丁智等<sup>[23]</sup>认为基坑开挖深度与邻近地铁埋深相近时, 隧道结构产生显著的水平位移和“横鸭蛋”式收敛变形, 竖向位移波动不大。有关基坑围护结构施工和基坑开挖对隧道变形的影响, 虽有较多学者进行了研究, 但基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析鲜有报道, 且缺乏对隧道变形模式的机理分析。

本文以杭州某地铁车站基坑工程为背景, 基于TRD(trench cutting re-mixing deep wall)等厚度水泥土搅拌墙、三轴搅拌桩、地下连续墙和基坑开挖依次施工时运营隧道变形监测数据, 总结不同施工阶段隧道变形模式, 从土压力动态变化角度分析隧道变形模式背后的机理; 并对隧道道床沉降、水平位移、隧道收敛3个监测项从围护结构开始施工到基坑垫层浇筑完成进行全过程定量分析。

## 1 工程概况

### 1.1 基坑概况

杭州某地铁车站长587 m、宽19.7 m、深18 m, 由7个小基坑组成, 其中#1, #3, #7坑中间增设一道地中壁。基坑分两期施工, 一期施工#1, #3, #5, #7基坑, 二期施工#2, #4, #6基坑, 基坑平面如图1所示。车站主体采用单柱双跨结构, 北面为2号河道, 南面为已开通运营1号线地铁车站, 在建基坑与已开通运营1号线车站结构最近只有5 m, 与1号线隧道相距8 m。基坑与隧道底部均位于-18 m深度处, 隧道位于深厚粉砂层。

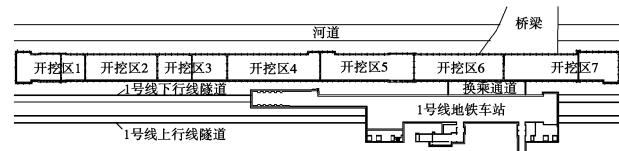


图1 基坑平面示意图

Fig. 1 Schematic layout of foundation pit

### 1.2 工程地质

围护结构深度所涉及土层大致分为: ①杂填土主要由黏性土混碎块石组成, 深度范围为0~2.1 m; ②砂质粉土, 深度范围为2.1~5.7 m; ③砂质粉土夹粉砂, 深度范围为5.7~12.3 m; ④粉砂, 深度范围为12.3~19.6 m; ⑤砂质粉土夹淤泥粉质黏土, 深度范围为19.6~25.2 m。土层物理力学参数见表1。

表1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

层号	固结快剪		$w$ /%	$\gamma$ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa
	$c$ / kPa	$\varphi$ / (°)			
②	10.1	30.4	24.5	19.2	10.52
③	10.2	30.4	23.8	19.5	10.67
④	9.0	31.0	24.8	19.4	11.25
⑤	12.1	28.5	28.4	19.0	8.72

### 1.3 围护结构形式

基坑与1号线隧道剖面见图2。基坑靠近运营隧道侧选用地下连续墙作为挡墙、坑外选用TRD作为止水帷幕、坑内选用三轴水泥搅拌桩作为坑内加固兼做槽壁加固。基坑南面地下连续墙厚度1000 mm, 埋深47 m。靠近运营隧道的基坑南侧TRD厚850 mm, 埋深35 m; 三轴水泥搅拌桩850 mm厚, 间距为600 mm, 埋深22 m。围护结构施工按照先TRD后三轴搅拌桩, 最后地下连续墙的顺序进行。#1基坑共有5道水平支撑, 第一道为1000 mm×800 mm钢筋混凝土支撑, 第二、三道为Φ609 mm×16 mm钢支撑, 第四、五道为Φ800 mm×16 mm钢支撑。

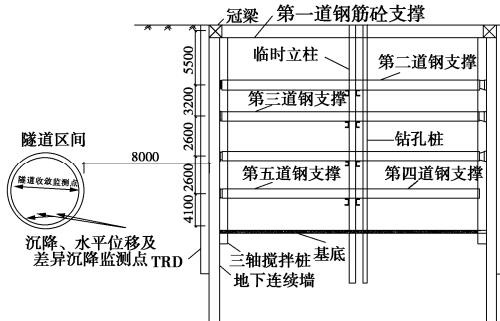


图 2 基坑与隧道区间剖面图

Fig. 2 Profile of foundation pit and tunnel

#### 1.4 监测方案

隧道与基坑平面图见图 3, 包括道床沉降、道床差异沉降、水平位移、隧道收敛 4 个监测项。其中道床沉降正号表示隆起, 负号表示沉降; 道床差异沉降正号表示隧道净空变大, 负号表示隧道净空变小; 水平位移正号表示隧道向基坑方向偏移, 负号表示隧道向基坑反方向偏移; 隧道收敛正号表示测距增大, 负号表示收敛测距减小。采用徕卡 TM50 全站仪对道床沉降、差异沉降、水平位移进行 1 d 一测, 采用徕卡 Disto D5 激光测距仪对隧道收敛进行 1 d 一测。

基坑监测点布置如图 4 所示, 其中, ZQT 代表围护结构侧移, DBC 代表地表沉降点, ZQC 代表墙顶竖向位移。

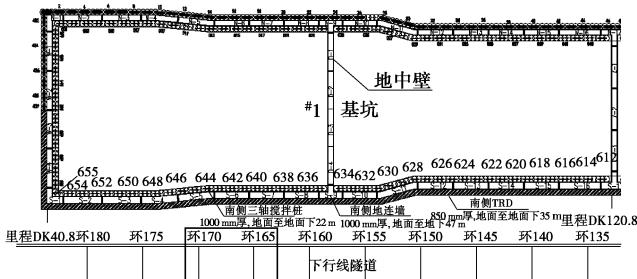


图 3 隧道与基坑平面图

Fig. 3 Plane of tunnel and foundation pit

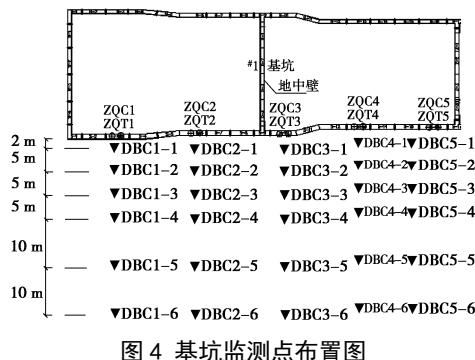


图 4 基坑监测点布置图

Fig. 4 Layout of monitoring points for foundation pit

## 2 围护结构施工对隧道变形影响

### 2.1 TRD 施工阶段隧道变形

1 号基坑 TRD 于 2018 年 5 月 22 日, 从里程 DK40.8 向 DK120.8 进行施工。环 165 和 170 平行对应位置的 TRD 于 2018 年 5 月 26 日一日内施工完成。隧道各项变形累计量见图 5。由于隧道监测均是在凌晨进行, 而 TRD 施工是在监测之后进行, 因此视 5 月 26 日监测数据为 TRD 施工前。

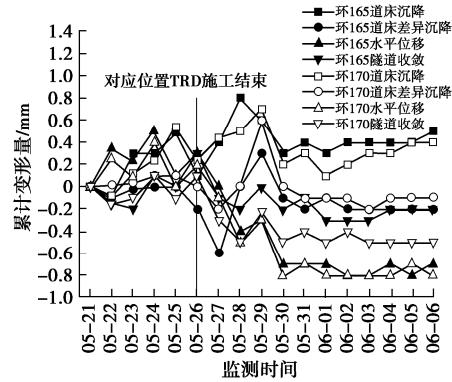


图 5 TRD 施工前后隧道累计变形

Fig. 5 Cumulative deformations of tunnel before and after TRD construction

从图 5 可以看出, 隧道环 165、环 170 变形规律基本一致。以环 165 为例, 在 TRD 施工前累计道床隆起量为 0.1 mm, 施工后最大道床隆起量为 0.8 mm, 随后道床隆起量为 0.4 mm 时趋于稳定; 道床差异沉降由 TRD 施工前累计道床差异沉降-0.2 mm 变为施工后最小累计道床差异沉降-0.6 mm, 随后不断增大至 0.3 mm, 最后稳定在-0.2 mm; 隧道向基坑反方向水平移动, 累计隧道水平位移由 TRD 施工前 0.3 mm 变为施工后最小-0.7 mm; 隧道收敛变小, 由施工前 0.3 mm 变为施工后-0.2 mm, 减小量为 0.5 mm; 此外, 随着 TRD 施工不断远离环 165 及 170, TRD 施工对相应位置隧道变形影响性减弱, 对应位置 TRD 施工结束 4 d 后隧道各项变形基本趋于稳定。

综合 4 个监测项变化规律, 可以发现, 在 TRD 施工结束后, 隧道呈现“水平收缩, 坚向拉伸”变形模式, 并伴随着隧道整体远离基坑水平位移, 如图 6 所示。TRD 施工是在添加一定比例膨润土的泥浆中进行, 槽壁形成一层泥皮, 泥浆压力转换为地层土颗粒的有效支护力, 进而增加邻近运营隧道左侧与下方有效土压力, 隧道在左右两侧以及上下两侧不平衡土压力作用下产生了远离基坑水平位移以及道床隆起, 期间隧道左侧及下方由于挤向土体使其受到的土压力形式发生了变化, 由原先的静止土压力变为被动土压力, 但左侧与下方附加土压力增长幅度更大, 使得左侧有效土压力大于右侧有效土压力, 下方有效土压力大于上方有效土压力, 如图 7 所示。因此隧道在水平方向

呈现背离基坑方向位移, 同时在竖向呈现隆起。随着孔压不断消散, 隧道左侧以及下方有效土压力慢慢减小, 期间存在一临界状态, 隧道左右两侧有效土压力以及上下两侧有效土压力均为一对平衡力, 从而隧道变形趋于稳定。

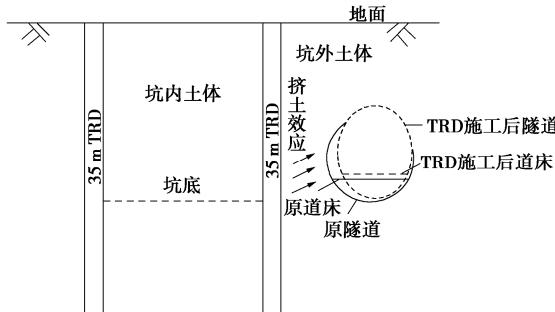


图 6 TRD 施工后隧道变形模式

Fig. 6 Deformation profile of tunnel after TRD construction

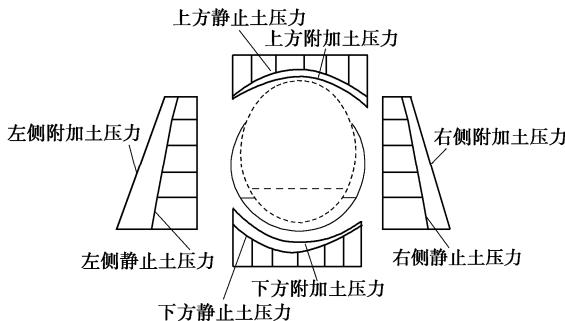


图 7 TRD 施工阶段隧道周围土压力变化

Fig. 7 Change of soil pressure around tunnel during TRD construction

## 2.2 三轴搅拌桩施工阶段隧道变形

三轴搅拌桩从#654 向#612 依次施工, 环 165、环 170 平行对应位置的三轴搅拌桩 637—641 于 2018 年 6 月 15 日 1 d 内施工完成。三轴搅拌桩施工前后隧道各项变形累计量见图 8。

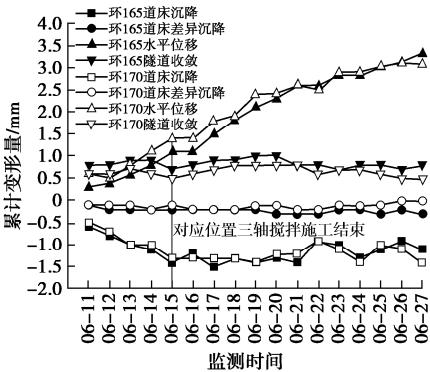


图 8 三轴搅拌桩施工前后隧道累计变形

Fig. 8 Cumulative deformations of tunnel before and after construction of triaxial mixing pile

从图 8 可以看出, 环 165 和 170 对应位置三轴搅

拌桩施工完成后, 道床和道床差异沉降变化均不明显; 隧道往基坑方向产生持续的水平移动, 伴随三轴搅拌桩施工隧道最大累计水平位移持续增大, 由 1.1 mm 增大至 3.3 mm, 增幅达 2.2 mm; 累计隧道收敛由三轴搅拌桩施工前 0.7 mm 变为施工后最大 1.0 mm, 最后稳定在 0.8 mm。将隧道水平位移变化量与隧道收敛变化量进行对比, 发现水平位移变化量比隧道收敛变化量要大, 证明隧道不是处于单一刚体移动状态, 而是处于整体移动, 自身也产生变形状态。综上所述, 可以发现在靠近隧道一侧 TRD 施工 20 余天后, 三轴搅拌桩施工对隧道道床沉降、道床差异沉降影响不大, 这是由于 TRD 施工完成形成了 30 m 深的屏障, 限制了隧道下土体位移, 从而对道床沉降及差异沉降影响不大。在进行三轴搅拌桩施工时, 主要影响隧道地面以上土体, 土体产生了向基坑方向的位移, 因此, 隧道变形主要表现在水平方向。

## 2.3 地下连续墙施工阶段隧道变形

地下连续墙施工采用“跳打法”, 环 165 所对应的地下连续墙于 2018 年 8 月 9 日开始施工, 8 月 10 日完成, 环 170 所对应的地下连续墙于 8 月 16 日开始施工, 8 月 17 日完成。在地下连续墙施工前后隧道各项累计量变化情况见图 9。

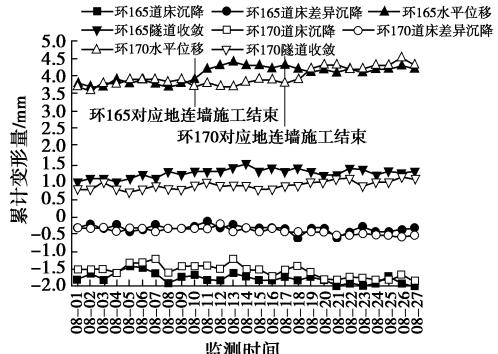


图 9 地下连续墙施工前后隧道累计变形

Fig. 9 Cumulative deformations of tunnel before and after construction of underground diaphragm wall

地下连续墙施工后, 道床出现小幅下沉; 道床差异沉降几乎不变; 隧道累计水平位移以环 165 为例, 由对应位置地下连续墙施工前 3.9 mm 增长到 4.4 mm, 增幅为 0.5 mm; 累计隧道收敛从 1.3 mm 增长到 1.5 mm, 增幅为 0.2 mm。总体而言隧道结构发生了“水平拉伸, 竖向收缩”变形, 同时伴随着隧道整体向基坑侧位移。

综上所述, 在靠近隧道一侧进行地下连续墙施工与三轴搅拌桩施工隧道变形规律基本一致, 隧道变形如图 10 所示。地下连续墙成槽施工相当于侧向卸荷, 使得靠近基坑一侧隧道侧向土压力减小, 隧道在两侧

不平衡力作用下发生了向基坑一侧移动，期间远离基坑一侧隧道受到的侧向土压力形式发生了变化，由原先静止土压力变为主动土压力，于是该侧向土压力随之下降，但基坑侧隧道侧向土压力降低幅度大于远离基坑侧隧道侧向土压力，隧道周边土压力变化如图 11 所示。当混凝土浇筑完成后使隧道左侧土压力与隧道右侧土压力变大，但隧道左侧土压力增加幅度大于右侧土压力增加幅度，在隧道左右两侧土压力增大的过程中，存在一临界状态隧道两侧土压力变为了一对平衡力，因此隧道不再变形。地下连续墙施工前后，隧道上下两侧土压力形成一对平衡力，保证了隧道净空高几乎无变化，而地下连续墙深度较大，卸荷作用较为明显，使得隧道下方土体向槽内移动，导致隧道出现微量沉降。因此隧道水平位移变形最为突出，隧道收敛次之，其次为道床沉降，道床沉降变形最为不明显。

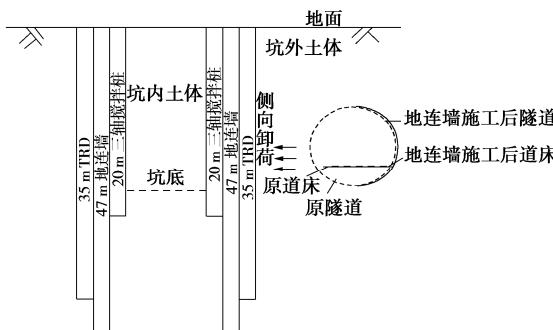


图 10 地下连续墙施工后隧道变形模式

Fig. 10 Deformation profile of tunnel after construction of underground diaphragm wall

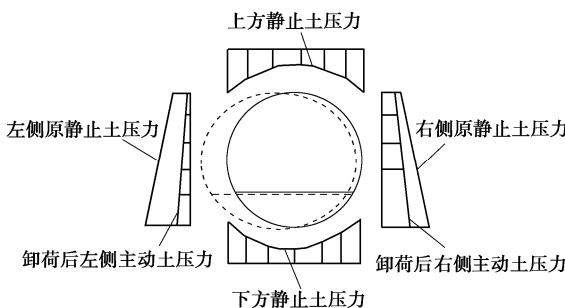


图 11 地下连续墙施工阶段隧道周边土压力变化

Fig. 11 Change of soil pressure around tunnel during construction of underground diaphragm wall

### 3 开挖阶段基坑与隧道变形

#### 3.1 隧道变形

图 12 为 #1 基坑开挖阶段隧道变形曲线，其中第一阶段为 0~11.3 m 土体开挖，第二阶段为 11.3~18.0 m 土体开挖，第三阶段为垫层浇筑。在基坑开挖

第一阶段时道床沉降变形不明显，随着开挖深度变大，道床有下沉趋势；道床差异沉降变化情况与道床沉降较为类似，在基坑开挖第二阶段时，隧道净空高不断变小；隧道水平位移随着开挖深度增加而增大；隧道收敛处于一直变大状态。深层土体开挖相比浅层土体开挖，隧道变形更加明显，当第三阶段底板垫层浇筑后，隧道整体变形得到了有效控制。

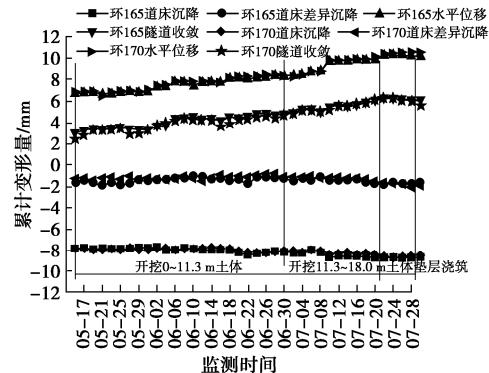


图 12 基坑开挖阶段隧道累计变形

Fig. 12 Cumulative deformations of tunnel during excavation of foundation pit

#### 3.2 围护结构侧移

图 13~15 分别为测斜管 ZQT2, ZQT3, ZQT4 不同开挖阶段水平位移曲线，曲线中数据为不同阶段累计侧移量减去基坑未开挖时围护结构累计侧移量，其中负号表示向基坑外位移，正号表示向基坑内位移。

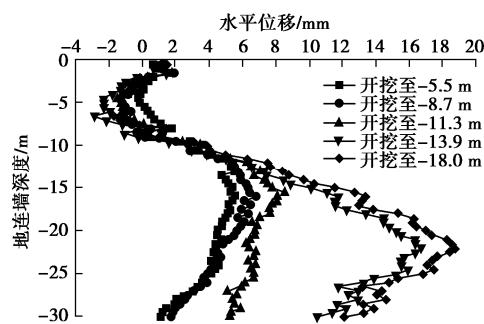


图 13 测斜管 ZQT2 水平位移

Fig. 13 Horizontal displacements of ZQT2

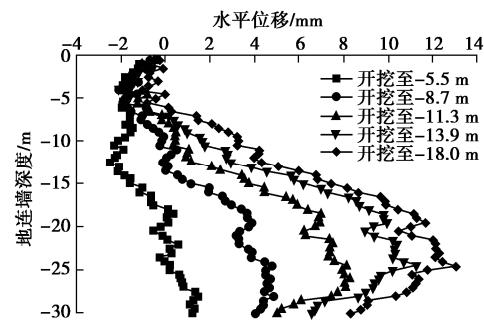


图 14 测斜管 ZQT3 水平位移

Fig. 14 Horizontal displacements of ZQT3

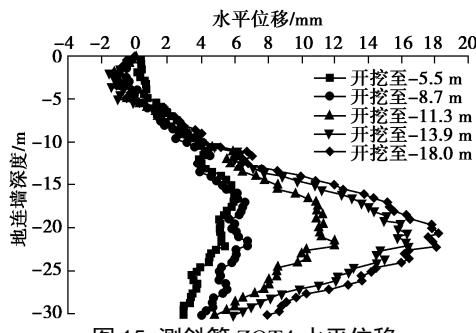


图 15 测斜管 ZQT4 水平位移

Fig. 15 Horizontal displacements of ZQT4

从图 13~15 可以发现, 随着基坑开挖深度增大地下连续墙水平位移量不断变大, 当基坑开挖至坑底(即-18 m 处) 地下连续墙水平位移量达到最大值。随着开挖深度加深, 地下连续墙最大水平位移位置不断向下。测斜管 ZQT2, ZQT3, ZQT4 最大水平位移分别为 18.69, 13.03, 18.24 mm。对比以上 3 个测斜管最大水平位移值可以发现, ZQT3 测点的水平位移最小, 这是因为 ZQT3 测点距离地中壁最近, 基坑存在空间效应造成。测斜点 ZQT3 在进行 5.5~8.7 m 深度范围土体开挖时, 相对水平位移变形较为显著, 这是由于施工机械、车辆停靠该处, 导致该处存在一定超载情况。测斜点 ZQT2, ZQT4 在进行 11.3~13.9 m 深度开挖时水平变形增幅较大, 这是由于开挖后支撑架设不及时造成的。

### 3.3 地表沉降

地表累计沉降曲线见图 16~18。曲线中数据为不同阶段累计地表沉降量减去基坑未开挖时累计地表沉降量, 其中负号表示下沉, 正号表示隆起。

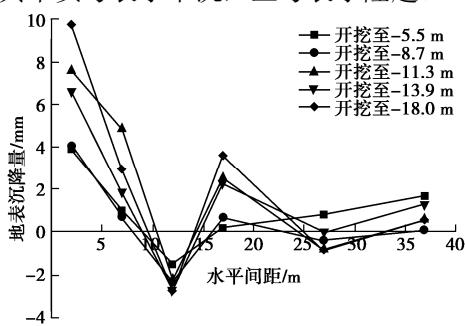


图 16 截面 DBC2 地表沉降

Fig. 16 Surface settlements of section DBC2

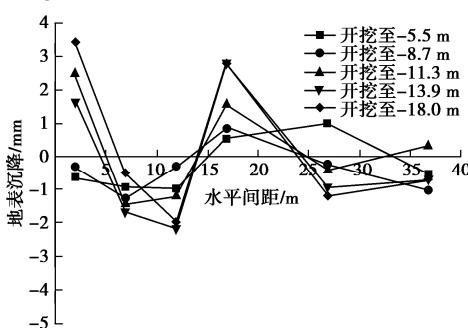


图 17 截面 DBC3 地表沉降

Fig. 17 Surface settlements of section DBC3

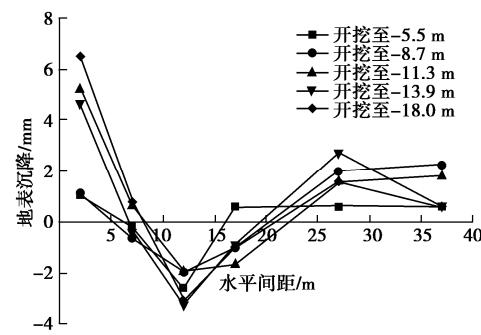


图 18 截面 DBC4 地表沉降

Fig. 18 Surface settlements of section DBC4

可以发现基坑开挖后, 距基坑较近位置, 地表随着基坑开挖深度加深隆起明显, DBC2, DBC3 以及 DBC4 截面最大隆起量分别为 9.74, 3.44, 6.50 mm。距离基坑较近地表竖向变形为隆起, 这是由于墙体与周围土体之间具有一定黏结力以及摩擦力, 当墙顶产生隆起位移时, 会通过黏结力以及摩擦力使周围土体产生了隆起变形。在距离基坑 7~15 m 范围内, 地表主要发生沉降变形, DBC2, DBC3, DBC4 最大沉降量分别为 3.24, 2.17, 2.79 mm。

### 3.4 墙顶竖向位移

图 19 为地下连续墙顶部竖向位移监测点 ZQC2, ZQC3, ZQC4 在基坑不同开挖阶段累计竖向位移曲线, 曲线中数据是由不同阶段墙顶累计竖向位移量折减开挖前一天墙顶累计竖向位移量。

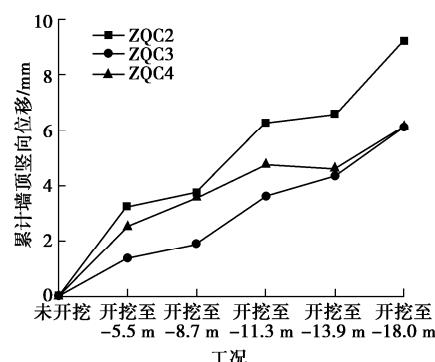


图 19 墙顶竖向位移

Fig. 19 Vertical displacements of top wall

可以发现, 基坑开挖引起墙顶产生隆起变形, 隆起量会随着开挖深度增加不断增大, 当第五层土体开挖结束后达到最大值, 顶部竖向位移监测点 ZQC2, ZQC3, ZQC4 最大隆起量分别为 9.24, 6.13, 6.16 mm。墙顶竖向位移、地表沉降、地下连续墙水平位移 3 个监测项最大变形量均小于预警值, 表明围护体系能够有效控制基坑开挖对周边环境的影响。

综合隧道变形、围护结构侧移、地表沉降、墙顶竖向位移, 总结基坑开挖引起隧道变形模式如图 20 所示。地下连续墙与隧道均产生向基坑侧水平位移,

且水平位移量均随着基坑开挖深度增大而变大，基坑开挖结束后，最大地下连续墙水平位移为 18.7 mm，对应位置隧道环 165 最大水平位移为 9.9 mm。隧道距离基坑 8 m，恰好处于地表沉降区间，这与隧道道床出现小幅沉降规律一致。这是由于基坑开挖结束后，由于侧向卸荷作用，地下连续墙在坑底以下出现最大水平位移，带动墙后土体向坑侧移动，导致隧道向基坑侧水平移动和道床沉降。

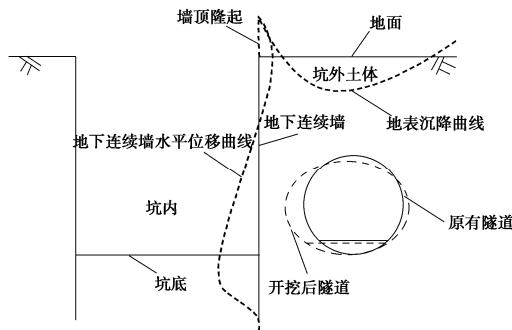


图 20 基坑开挖变形示意图

Fig. 20 Deformations of excavation of foundation pit

#### 4 不同施工阶段隧道变形情况

基坑施工时环 170 全过程变形曲线如图 21 所示。可以发现道床沉降、水平位移、隧道收敛在围护结构施工阶段变形总体发展较为平稳，变形量也较小。道床沉降在围护结构与基坑开挖施工间隙增幅最大，变形量增加较为明显，在此施工间隙，累计道床沉降由 1.9 mm 增长至 7.8 mm；隧道水平位移在围护结构施工阶段增幅最大，累计隧道水平位移由 0 mm 增长至 4.6 mm；隧道收敛在基坑开挖阶段增幅最大，累计隧道收敛由 2.5 mm 增长至 5.6 mm。全过程施工结束后，隧道处于整体下沉、向基坑侧移动状态，并存在着自身水平向拉伸的情况。

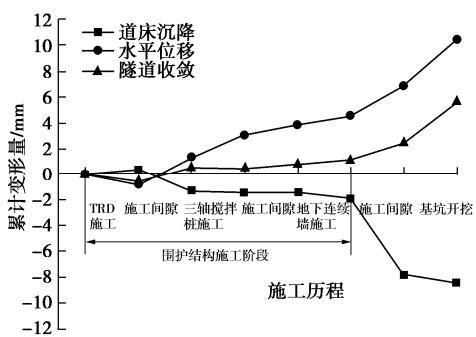


图 21 各阶段隧道变形

Fig. 21 Deformations of tunnel at each stage

各施工阶段隧道变形占比见图 22。围护结构与基坑开挖施工间隙产生的道床沉降量占总道床沉降量比例最大，达到了 70.24%，可能是由于围护结构与基坑开挖施工间隙达到 280 d，期间隧道受自身质量以及

土体固结影响产生了较大的沉降，而在以往研究过程中往往忽视了施工间隙隧道变形，因此在实际工程中建议缩短各施工阶段间隙。隧道水平位移在围护结构施工阶段增加量最为突出，占总水平位移量 43.81%；其次为基坑开挖阶段，占总水平位移量 34.29%，这是由于基坑开挖时围护结构已形成竖向屏障。隧道收敛量在基坑开挖阶段增加量最大，占总隧道收敛量 55.26%。

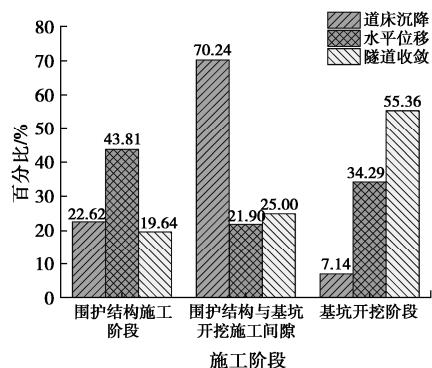


图 22 各施工阶段隧道变形占比

Fig. 22 Proportion of deformation of tunnel in each construction stage

#### 5 结 论

(1) 围护结构施工阶段，TRD 施工引起隧道整体远离基坑侧水平移动，隧道自身发生“水平收缩，竖向拉伸”变形；三轴搅拌桩施工引起隧道向基坑侧水平移动；地下连续墙施工引起隧道整体向基坑侧移动，隧道自身发生“水平拉伸，竖直收缩”变形。

(2) 基坑开挖阶段，由于卸荷作用，地下连续墙向坑内变形，带动墙后土体向坑侧移动，导致隧道向基坑水平位移和道床沉降。

(3) 围护结构与基坑开挖施工间隙产生的道床沉降量占总道床沉降量 70.24%；隧道水平位移在围护结构施工阶段增加量占总水平位移量 43.81%；隧道收敛量在基坑开挖阶段增加量占总隧道收敛量 55.26%。

(4) 施工间隙隧道发生较大变形，只分析围护结构施工或者基坑开挖阶段对隧道变形影响，对控制隧道变形不安全，建议在实际工程中缩短各施工阶段间隙。

#### 参考文献：

- [1] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 431 – 439. (HU Hai-ying, ZHANG Yun-cheng, YANG Guang-hua, et al. Measurement and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J].)

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 431 - 439. (in Chinese))
- [2] 魏纲, 厉京, 宣海力, 等. 大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, **15**(3): 718 - 726. (WEI Gang, LI Jing, XUAN Hai-li, et al. Monitoring data analysis on the influence of large deep foundation pit excavation on nearby metro shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, **15**(3): 718 - 726. (in Chinese))
- [3] 邵华, 王蓉. 基坑开挖施工对邻近地铁影响的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(增刊1): 1403 - 1408. (SHAO Hua, WANG Rong. Monitoring data analysis on influence of operating metro tunnel by nearly excavation construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(S1): 1403 - 1408. (in Chinese))
- [4] 林平, 夏汉庸, 郑云文. 基坑开挖引起的隧道变形事故处理效果分析[J]. 西部探矿工程, 2014, **26**(11): 159 - 163. (LIN Ping, XIA Han-yong, ZHENG Yun-wen. Analysis of tunnel deformation accident caused by foundation pit excavation[J]. West-china Exploration Engineering, 2014, **26**(11): 159 - 163. (in Chinese))
- [5] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1109 - 1116, 1140. (ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(4): 1109 - 1116, 1140. (in Chinese))
- [6] 鲁嘉, 姜天鹤, 胡康虎, 等. 大深度地下连续墙施工对周边环境变形的影响[J]. 建筑科学, 2014, **30**(3): 101 - 106. (LU Jia, JIANG Tian-he, HU Kang-hu, et al. Effect on environmental deformation due to deep diaphragm construction[J]. Building Science, 2014, **30**(3): 101 - 106. (in Chinese))
- [7] POH T Y, WONG I H. Effects of construction of diaphragm wall panels on adjacent ground: Field trial[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **124**(8): 749 - 756.
- [8] LEI G H, SUN H S, NG C W W. An approximate analytical solution for calculating ground surface settlements due to diaphragm walling[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **61**(3): 108 - 115.
- [9] 王卫东, 陈永才, 吴国明. TRD水泥土搅拌墙施工环境影响分析及微变形控制措施[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊1): 1 - 5. (WANG Wei-dong, CHEN Yong-cai, WU Guo-ming. Impact analysis and macro-deformation control measures of TRD construction cement-soil mixing walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 1 - 5. (in Chinese))
- [10] SHI J W, NG C W W, CHEN Y H. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel[J]. Computers and Geotechnics, 2015, **63**: 146 - 158.
- [11] SHI C H, CAO C Y, LEI M F, et al. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, **51**: 175 - 188.
- [12] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 599 - 612. (ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 599 - 612. (in Chinese))
- [13] 沈雯, 沈蓉, 孙廉威. 超深基坑分区开挖对侧方地铁影响的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(增刊1): 354 - 360. (SHEN Wen, SHEN Rong, SUN Lian-wei. Field monitoring and analysis on the influence of deep excavation on adjacent metro[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(S1): 354 - 360. (in Chinese))
- [14] ZHANG D M, XIE X C, LI Z L, et al. Simplified analysis method for predicting the influence of deep excavation on existing tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **121**.
- [15] 文新伦. 紧邻地铁隧道的三轴搅拌桩施工参数选择与应用[J]. 建筑施工, 2010, **32**(4): 316 - 318. (WEN Xin-lun. Selection and application of construction parameter of triaxial mixing pile close to metro tunnel[J]. Building Construction, 2010, **32**(4): 316 - 318. (in Chinese))
- [16] 朱蕾. SMW工法水泥土搅拌桩施工期间相邻隧道的变形监测[J]. 铁道建筑, 2007(2): 46 - 47. (ZHU Lei. Monitoring the deformation of adjacent tunnels during the construction of SMW cement-soil mixing pile[J]. Railway Engineering, 2007(2): 46 - 47. (in Chinese))
- [17] 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**(增刊1): 53 - 56. (WANG Zhan-sheng, PAN Huang-song, ZHUANG Qun-hu, et al. Impact of pit supporting SMW pile construction on underneath shield tunnel deformation[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 53 – 56. (in Chinese))
- [18] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(3): 284 – 288. (KUANG Long-chuan. Influence of construction of deep foundation pit on tunnels of metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(3): 284 – 288. (in Chinese))
- [19] CHEN R P, MENG F Y, LI Z C, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **58**: 224 – 235.
- [20] 王立峰, 庞晋, 徐云福, 等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(7): 2004 – 2010. (WANG Li-feng, PANG Jin, XU Yun-fu, et al. Influence of foundation pit excavation on adjacent metro tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(7): 2004 – 2010. (in Chinese))
- [21] LIU B, ZHANG D W, YANG C, et al. Long-term performance of metro tunnels induced by adjacent large deep excavation and protective measures in Nanjing silty clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **95**.
- [22] SHI J W, FU Z Z, GUO W L. Investigation of geometric effects on three-dimensional tunnel deformation mechanisms due to basement excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **106**: 108 – 116.
- [23] 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. (in Chinese))

### 第三届全国软土工程学术会议第一号通知（征文）

第一届全国软土工程学术会议本着“软土工程的理论创新与工程实践”的主题,于2013年11月在同济大学顺利召开。第二届全国软土工程学术会议围绕着“软土工程的性能与安全”的主题,于2017年11月在天津大学成功举办。第三届全国软土工程学术会议将于2021年11月中旬在南京召开。全国各地软土工程专家学者将欢聚一堂,以“软土工程智能建造”为主题,针对重大软土工程问题、软土工程新理论、新技术以及学科发展进行研讨。

本次会议将为学者和同行面对面深入广泛的学术交流研讨提供机会,届时将邀请土力学与软土工程领域的知名专家学者就软土工程学科的发展作综述报告,共同探讨土力学与软土工程学科的发展趋势,展现最新研究进展和成果。

会议将通过大会特邀报告、主题报告、分组报告、研究生专场报告等形式,大家共享新思想,激发新思维,拓宽新视野,进一步推动我国在软土工程的理论和工程实践等方面的进程,促进我国软土工程领域的可持续发展。

会议主要研讨软土工程的基本理论、实践探索、新技术和

新方法等。征文内容包括以下10个方面。  
 ①软土的基本特性与本构关系;②软土工程勘察、测试与智能评价;③软土地基处理创新与智能化施工;④软土基础工程;⑤软土地下工程;  
 ⑥软土动力学与地震工程;⑦软土工程数值仿真与信息化技术;  
 ⑧绿色软土工程;⑨软土地区重大工程实践;⑩软土工程的其他问题。

应征论文须符合上述征文内容要求,且未公开发表过,作者文责自负,字数一般不超过8000字(6页以内,含图表与公式)。

学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查,录用论文将推荐至《岩土工程学报》增刊、《建筑科学与工程学报》正刊等形式发表。论文格式详见《岩土工程学报》征稿简则,期刊录用论文的版面费按照各期刊要求收取。

论文请通过电子邮件发到大会秘书处会务邮箱  
 (softsoilseu@163.com),并注明作者的详细通讯地址、邮编、联系电话及Email地址。