

邻近运营隧道的大型基坑放坡开挖影响与实测分析*

杨 革¹ 段 罗¹ 黄 通¹ 徐前卫² 崔越榜²

(1. 中铁二局第五工程有限公司, 610091, 成都; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 基坑及隧道因建设过程的差异存在复杂的耦合作用, 在基坑施工过程中会不可避免地既对既有运营隧道产生扰动, 引起隧道的位移, 严重时影响隧道运营安全。因此, 有必要研究合理的基坑开挖方法和开挖步序, 以减少基坑开挖过程中对既有邻近隧道的影响。[方法] 依托某下沉式广场基坑, 采用有限元数值模拟的方法针对邻近既有隧道的基坑的4种开挖工况进行研究, 分析了不同开挖方法、开挖步序下的隧道内力分布规律、位移变化趋势及地层变形特征, 比较了不同工况对施工期间隧道变形的影响, 并结合基坑开挖期间的现场实际监测数据加以验证分析。[结果及结论] 与拉槽放坡开挖相比, 普通放坡开挖引起的隧道竖向变形较小; 与整层开挖相比, 接续开挖引起的隧道竖向变形较小; 不同工序的隧道竖向变形最终结果较接近; 与接续开挖相比, 整层开挖引起的隧道水平变形比较大, 这主要是由开挖步序多、基坑的时空效应明显所导致。根据现场实际监测数据, 施工期间隧道竖向变形、水平变形, 以及轨道竖向相对变形呈现先增大、后减小的趋势。

关键词 基坑; 放坡开挖; 隧道变形

中图分类号 TU433; TU94

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.029

Influence of Large-scale Foundation Pit Sloping Excavation on Adjacent Operating Metro Tunnel and Actual Measurement Analysis

YANG Ge¹, DUAN Luo¹, HUANG Tong¹, XU Qianwei², CUI Yuebang²

(1. China Railway Erju No. 5 Engineering Co., Ltd., 610091, Chengdu, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] There are complex coupling effects between foundation pit and tunnel due to different construction processes. The foundation pit construction will inevitably cause disturbance to the existing operation tunnel, leading to displacement of the tunnel and even affecting its operation safety in serious cases. Therefore, it is necessary to study proper foundation pit excavation methods and excavation steps to re-

duce the excavation influence on the existing adjacent tunnel.

[Method] Based on a sunken plaza foundation pit, the finite element numerical simulation is used to study four excavation conditions of the foundation pit adjacent to the existing tunnel. The distribution pattern of the tunnel internal force and the tunnel displacement trend as well as the deformation characteristics of the stratum under different excavation methods and steps are analyzed, and the effects of different working conditions on the tunnel deformation during excavation are compared. The results are verified and analyzed in combination with the actual monitored on-site data during the foundation pit excavation.

[Result & Conclusion] Compared with the trenching excavation, the ordinary slope excavation causes less vertical tunnel deformation. Compared with the layered excavation, the continuous excavation induces less vertical deformation. The final vertical deformations of the tunnel under different steps are close to each other. Compared with continuous excavation, the layered excavation causes larger tunnel horizontal deformation, mainly resulting from multiple excavation steps and notable spatial and temporal effect of the foundation pit. According to the actual monitored on-site data, the vertical and horizontal deformations of the tunnel and the relative vertical deformation of the track present a trend of first increasing and then decreasing during construction.

Key words foundation pit; slope excavation; tunnel deformation during operation

0 引言

邻近既有运营地铁隧道的基坑在开挖土方卸载过程中会不可避免地引起运营隧道的位移。在开挖过程中如何有效控制地铁隧道的受力及变形已经成为热点问题^[1-2]。

针对基坑开挖对邻近既有隧道的影响性的研究, 国内外已有大量研究。文献[3]和文献[4]分别以基坑的开挖面积和深度, 以及基坑与隧道的相对

* 国家自然科学基金面上项目(41672360)

位置作为影响因素对邻近隧道的影响规律进行了研究。

文献[5]回顾了近年来国内外基坑工程与地下工程技术的发展,分析了基坑工程引起的环境影响;文献[6]研究了适用于邻近基坑开挖卸载对既有隧道结构影响理论;文献[7]研究了邻近隧道不同围护结构及开挖方法对隧道受力变形的控制效果;文献[8]结合监测数据分析了基坑不同开挖阶段对周边环境的影响规律和特点;文献[9]分析了施工过程对基坑及隧道变形位移的影响并提出了控制措施。文献[10]研究了不同基坑开挖方法下对邻近隧道的变形及受力规律。

上述研究表明基坑施工会对邻近既有隧道产生扰动,有必要研究合理的基坑开挖方法以减少影响。虽然关于基坑邻近既有隧道的研究颇多,但针对邻近隧道放坡开挖的合理开挖方法与步序的研究较少。本文针对邻近既有隧道的基坑四种开挖工况进行研究,分析了不同开挖方法和开挖步序下的隧道内力分布规律与位移发展趋势以及地层变形特征,通过比较不同开挖步序对隧道的影响情况以得到合适的工程方案,最后结合现场监测数据加以验证分析该开挖方案的合理性。

1 工程概况

1.1 工程简介

深圳岗厦北综合交通枢纽西区北侧下沉广场基坑(以下简称“案例基坑”)紧邻既有运营的深圳地铁2号线(以下简称“2号线”)。该基坑长333.98 m,宽46.70~56.50 m,深11.20~25.45 m。基坑北侧采用喷锚护坡进行放坡开挖,南侧为前期施工完成的西区地下空间既有结构。案例基坑的平面布置图如图1所示,放坡施工实景图如图2所示。

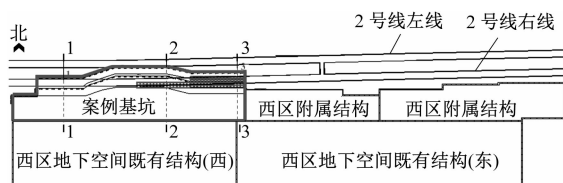


图1 案例基坑的平面布置图

Fig.1 Layout plan of the case foundation pit

1.2 工程地质条件

案例基坑所处地层从上至下为素填土、素填土



图2 案例基坑的放坡施工实景图

Fig.2 Construction picture of the case foundation pit slope excavation

(碎石)、砂砾、砾质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩。

案例基坑周边区域地下水主要有松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两类。勘察测得地下水位埋深为2.00~6.20 m,高程为1.09~6.88 m。根据地区经验,地下水位的年平均变化幅度为2.0~3.0 m,故地下水埋深按平均情况取4.5 m。

2 有限元数值模拟

2.1 计算断面的选取

为研究基坑开挖施工步序对既有隧道变形影响趋势,根据隧道与基坑的空间相对位置关系,分别选取案例基坑的3个典型计算断面(断面位置见图1)建立有限元计算模型。各断面处的基坑与隧道相对位置关系见表1。断面3-3处的隧道与基坑空间位置关系如图3所示。3个计算断面中,断面1-1和断面2-2隧道的拱腰以下处于中风化花岗岩和微风化花岗岩地层,地层岩性好抵抗变形能力强,而断面3-3隧道位于全风化(土状强风化)花岗岩,地层整体性较差。

表1 各断面处的基坑与隧道相对位置关系

Tab.1 Relative position relationship between foundation pit and tunnel in each section

断面	坑底宽度/ m	坑底与隧道 净距/m	围护桩底与 隧道净距/m	坡脚与隧道 最小距离/m
断面1-1	21.04	5.51	3.01	9.38
断面2-2	27.30	4.35	2.85	4.73
断面3-3	21.45	3.35	0.85	9.86

2.2 建立模型

不同断面的有限元计算模型均宽70 m,高35 m。其中断面3-3处的有限元计算模型如图4所示。

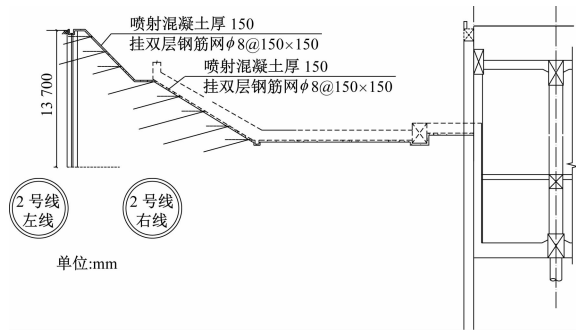


图 3 断面 3-3 处隧道与基坑相对位置图

Fig. 3 Schematic diagram of relative position between tunnel and the foundation pit at Section 3-3

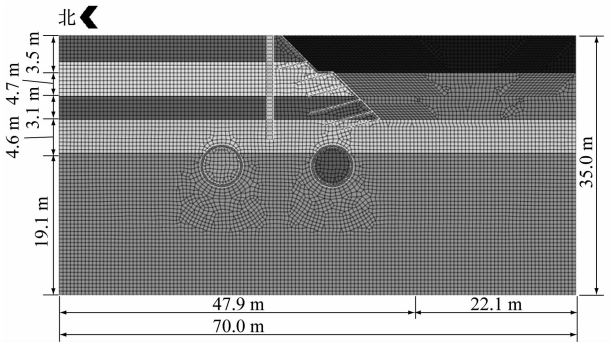


图 4 断面 3-3 处有限元计算模型

Fig. 4 Finite element calculation model of Section 3-3

在有限元计算模型中各地层采用修正摩尔-库伦本构模型,土体物理力学参数如表 2 所示,结构单元计算参数如表 3 所示。

表 2 土体物理力学参数表

Tab.2 Physical and mechanical parameters of soil

地层	重度/ (kN/m ³)	压缩模 量/MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa
素填土	18.2	5	15.0	12.0
砾质黏性土	18.1	6	23.0	22.0
全风化花岗岩	18.6	8	24.0	24.5
土状强风化花岗岩	18.9	12	27.0	25.5
中等风化花岗岩	26.0	1 300	27.0	200.0
微风化花岗岩	26.5	6 000	39.0	700.0

2.3 施工步骤

在有限元计算模型中,各断面均考虑降水流固耦合放坡整层开挖。各断面计算所用的施工步骤如表 4 所示。

2.4 结果比较分析

经有限元模型计算,得到典型施工步骤下各断面的右线隧道竖向位移变化曲线及水平位移变化曲线,分别如图 5 及图 6 所示。

表 3 结构单元计算参数表

Tab.3 Table of structural unit calculation parameters

结构	材料	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg/m ³)
喷射混凝土	C20 混凝土	20 000	0.20	22
锚杆	钢材	250 000	0.30	76
围护桩	水泥浆	20 000	0.33	19
隧道衬砌	C30 混凝土	30 000	0.20	24

表 4 各断面计算所用的施工步骤

Tab.4 Construction steps for each section calculation

步骤	施工内容	说明
步骤 1	初始渗流场分析	稳态分析
步骤 2	初始应力场分析	应力分析
步骤 3	隧道开挖并施作衬砌	位移清零
步骤 4	施作基坑围护桩	
步骤 5	第一次降水	水位降至第一层开挖面下 1.0 m
步骤 6	第一层土开挖	
步骤 7	第二次降水	水位降至第二层开挖面下 1.0 m
步骤 8	第二层土开挖	

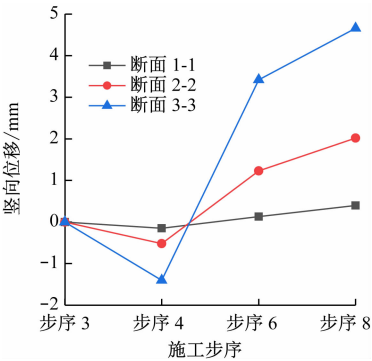


图 5 典型施工步骤下右线隧道各断面处竖向位移变化曲线

Fig. 5 Curves of vertical displacement at each section of the right line tunnel according to typical construction steps

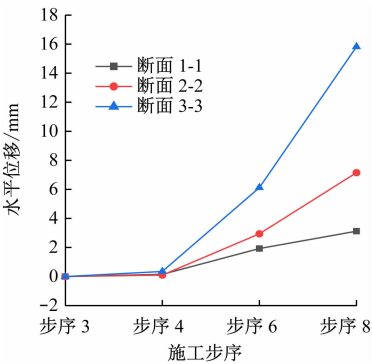


图 6 典型施工步骤下右线隧道各断面处水平位移变化曲线

Fig. 6 Curves of horizontal displacement at each section of the right line tunnel according to typical construction steps

由图 5 可以看出,在围护桩施作后隧道结构表现为下沉趋势,左拱腰和拱顶相对于隧道其余下沉显著。比较可见,断面 3-3 竖向位移量变化最大,为 4.72 mm,基坑开挖卸载对引起隧道竖向位移最为显著,这主要是由于断面 3-3 隧道拱腰以上处于全风化花岗岩和拱腰以下处于土状强风化花岗岩当中,地层条件相对较差。

图 6 为典型施工步序下右线隧道各断面的水平位移变化曲线。由图 6 可知,围护桩施工结束隧道水平位移变化不显著,随着基坑开挖,隧道朝向卸土方向水平位移量逐渐增大。比较水平位移可见:断面 3-3 > 断面 2-2 > 断面 1-1,断面 3-3 拱顶水平位移最大为 15.78 mm,受基坑开挖引起的水平位移最为显著。这主要是由于断面 1-1 隧道拱腰下部为微风化花岗岩,地层稳定且约束作用强,而断面 2-2 隧道完全位于强风化花岗岩而下卧地层为中(微)风化花岗岩,地层条件较为良好,而断面 3-3 隧道地层为全风化(土状强风化)花岗岩,地层条件相对较差。

图 7 为基坑开挖结束时的隧道变形矢量图。由图 7 可以看出:隧道右拱腰向基坑开挖区域位移趋势明显;左拱腰更多表现为水平移动,这主要是由于隧道上方围护桩限制作用。对于隧道结构,由于右上方的挖土引起土体产生自由位移场,而土体与隧道结构的相互耦合,使得隧道向地层损失区域位移,故隧道表现出斜向的椭圆形。

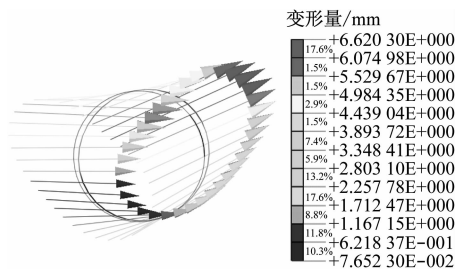


图 7 基坑开挖结束时的隧道变形矢量图

Fig. 7 Tunnel deformation vector illustration at the end of foundation pit excavation

3 基坑开挖计算工况的影响

3.1 放坡开挖方法与开挖分部

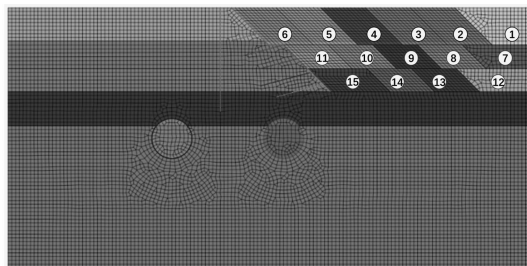
以隧道变形较大的断面 3-3 为研究断面,进行基坑不同开挖方法与步序的影响性研究。按开挖方向,开挖方法可分为普通放坡开挖和拉槽放坡开挖,按开挖分层情况可进一步细分为整层开挖和接

续开挖。由此,基坑开挖的计算工况如表 5 所示。各工况的开挖分部如图 8 所示。

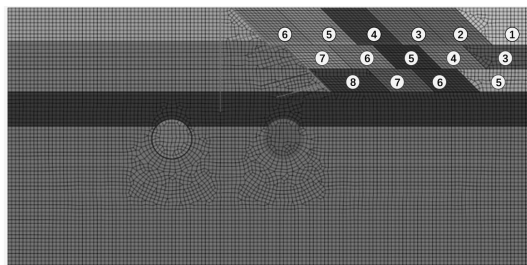
表 5 基坑开挖计算工况

Tab. 5 Calculation conditions of foundation pit excavation

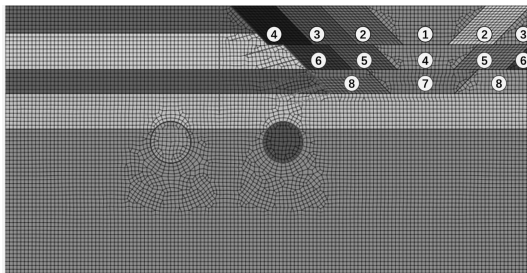
工况	开挖方法	开挖分层情况	开挖分部数
工况 1	普通放坡开挖	整层开挖	15
工况 2	普通放坡开挖	接续开挖	8
工况 3	拉槽放坡开挖	整层开挖	8
工况 4	拉槽放坡开挖	接续开挖	6



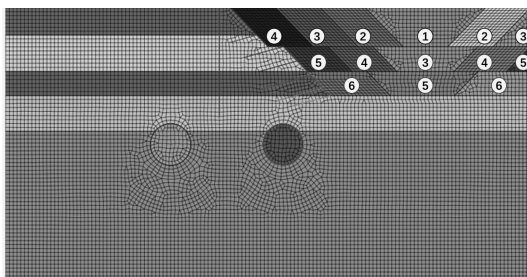
a) 工况 1



b) 工况 2



c) 工况 3



d) 工况 4

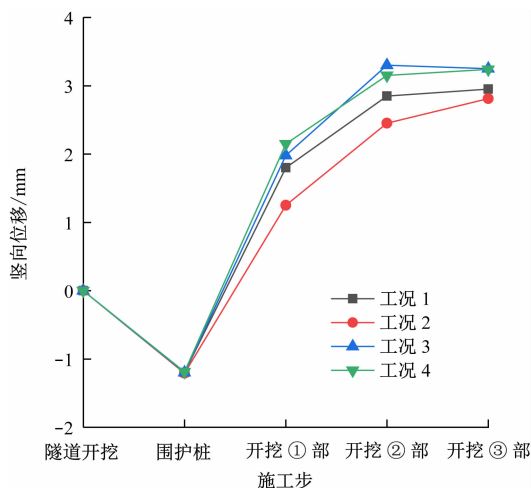
注:①等为开挖分部序号。

图 8 各工况的开挖分部示意图

Fig. 8 Excavation distribution under different construction conditions

3.2 隧道竖向变形

经有限元计算可得,各工况下相应施工步结束时的隧道竖向位移值曲线如图9所示。由图9可知,隧道总体呈现先下沉、再上浮、最后稳定的趋势。经分析:由围护桩墙打入地层而产生的挤土变形会引起隧道下沉;而后在开挖中,隧道上浮逐渐趋于稳定。



注:开挖①部指完成分部①的开挖。下同。

图9 各工况下的隧道竖向位移曲线

Fig. 9 Tunnel vertical displacement curves under different construction conditions

由图9可见,工况1和工况2的隧道竖向位移约为2.9 mm,工况3和工况4的隧道竖向位移约为3.3 mm。这说明普通放坡开挖引起的隧道竖向位移比拉槽放坡引起隧道竖向位移开挖小。进一步分析可知,与接续开挖相比,由于整层开挖方法的施工步多且时间长,受地层的时空效应影响,其引起竖向位移比较大,但二者最终位移量基本接近。

3.3 隧道水平变形

图10为各工况下的隧道水平位移曲线。由图10可知,隧道水平位移总体呈现向基坑开挖区域方向,且随着施工进行,隧道水平位移有逐渐增大的趋势。

由图10可见,工况1和工况2的隧道最终水平位移约为11.2 mm,而工况3和工况4的隧道最终水平位移约为11.5 mm,说明普通放坡开挖引起的隧道最终水平位移比拉槽放坡开挖引起的隧道最终水平位移小。进一步分析可知:整层开挖引起的隧道水平位移增长较均匀;接续开挖引起的隧道水平位移增大程度较大,而最终位移量小。

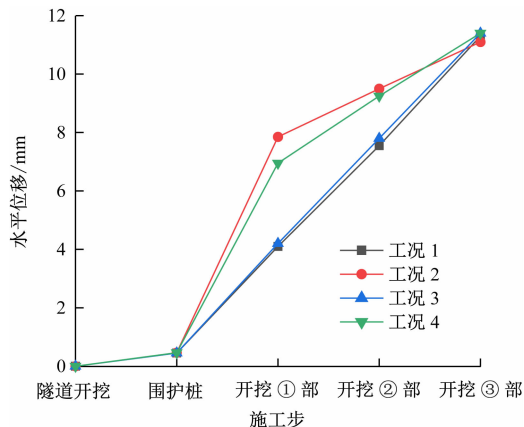


图10 各工况下的隧道水平位移曲线

Fig. 10 Tunnel horizontal displacement curves under different construction conditions

3.4 隧道衬砌内力

图11为各工况下的隧道衬砌轴力变化曲线。总体上看:在施作基坑围护桩后,隧道最大轴力增加;随着第一层土体开挖结束,轴力减小;而后,隧道轴力缓慢增加。比较可见:拉槽放坡开挖引起的隧道轴力比普通放坡开挖引起的隧道轴力小;在工况4下的隧道轴力最小,仅为732.6 kN。由此可知,若在施工中采用普通放坡开挖方法,则需要关注隧道衬砌轴力的变化。

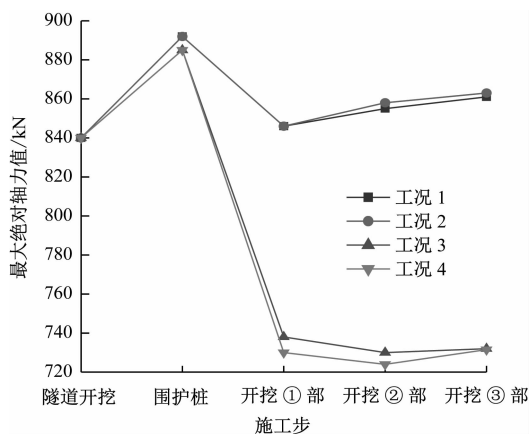


图11 各工况下的隧道衬砌轴力变化曲线

Fig. 11 Tunnel lining axial force curves under different construction conditions

图12为各工况下的隧道衬砌剪力变化曲线,图13为隧道衬砌弯矩变化曲线。由图12及图13可见:隧道衬砌剪力和弯矩变化曲线相似;随着施工的进行,隧道衬砌的剪力和弯矩均逐渐增大;工况3在第一层土开挖结束后剪力减小,主要是由于隧道与土层的位移同步性强,隧道的变形相对较小,剪

力作用较小的缘故;在开挖第一层土体前,与工况 3 和工况 4 相比,工况 1 和工况 2 的衬砌剪力和弯矩较大;随后,拉槽放坡开挖引起的隧道剪力和弯矩增加程度逐渐大于普通放坡开挖引起的隧道剪力和弯矩增加程度;施工结束后,工况 4 最大剪力为 109.8 kN,最大弯矩为 133.8 kNm;4 种工况下的隧道衬砌剪力和弯矩最终值相近。

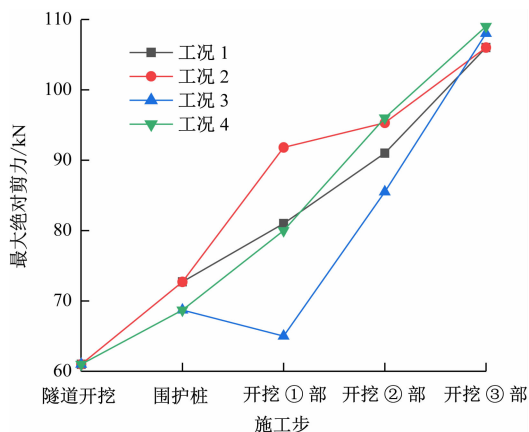


图 12 各工况下的隧道衬砌剪力变化曲线

Fig. 12 Tunnel lining shearing force curves under different construction conditions

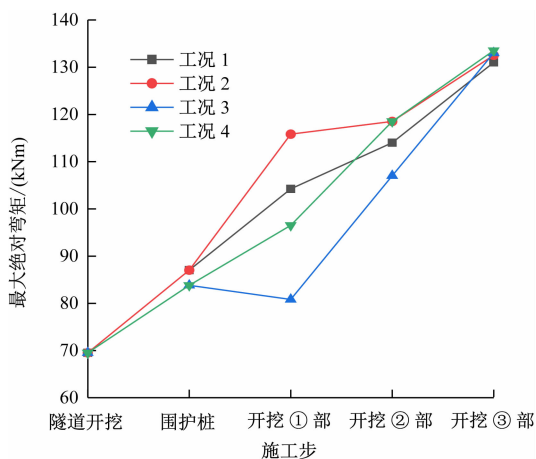


图 13 各工况下的隧道衬砌弯矩变化曲线

Fig. 13 Tunnel lining bending moment curves under different construction conditions

4 实测数据分析

4.1 监测方案

根据施工监测方案,在隧道内每隔 10 m 布置 1 个监测断面。在施工现场,断面 3-3 处(里程 YDK26+703)隧道自动化监测点布置图如图 14 所示。

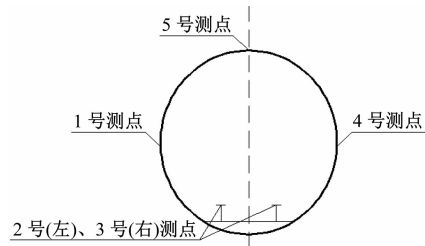


图 14 断面 3-3 处隧道自动化监测点布置图

Fig. 14 Layout of automatic monitoring points at Section 3-3

根据设计要求,隧道自动化监测项目及其限值要求如表 6 所示。

表 6 隧道自动化监测项目及其限值要求

Tab. 6 Tunnel automatic monitoring items and the limit requirement

监测项目	预警值/mm	报警值/mm	控制值/mm
结构变形	6.0	8.0	10.0
轨道差异沉降	2.0	3.2	4.0

4.2 监测数据分析

实际施工采取拉槽放坡接续开挖方法。根据现场监测数据,绘制施工期间的隧道竖向变形曲线,如图 15 所示。由图 15 可知:在围护结构施作完成前,隧道有早期竖向沉降,最大沉降为 2.5 mm;在第一层土方开挖过程中,隧道逐渐上浮,沉降量为 0.4 ~ 2.5 mm;在随后的第二、三层土方开挖中,隧道沉降逐渐恢复并且出现上浮,隧道竖向变形减慢,最后再上浮 1.2 mm 左右,在变形控制范围内。

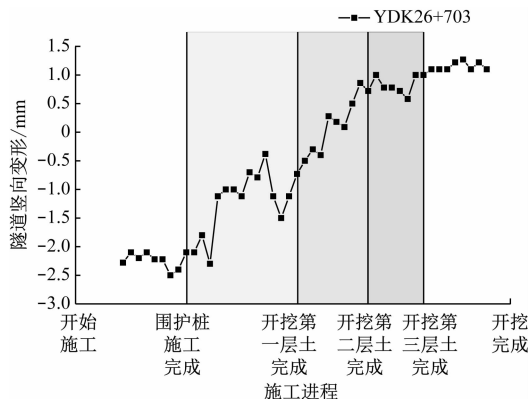


图 15 施工期间隧道竖向变形曲线

Fig. 15 Tunnel vertical deformation curve during construction

图 16 为施工期间隧道水平收敛变形历时曲线,由图 16 可知:在基坑围护桩施工完成之前,隧道的最大水平收敛量为 5.1 mm;在开挖第一层土期间,左右拱腰的水平收敛量出现一定程度恢复;在开挖

第二、三层土期间,由于揭露地层愈加接近隧道,故隧道水平收敛变形恢复显著,最小水平收敛值为1.4 mm;而后,停止挖土,隧道水平收敛变形量增大,最终稳定在2.7 mm附近,满足变形控制要求。

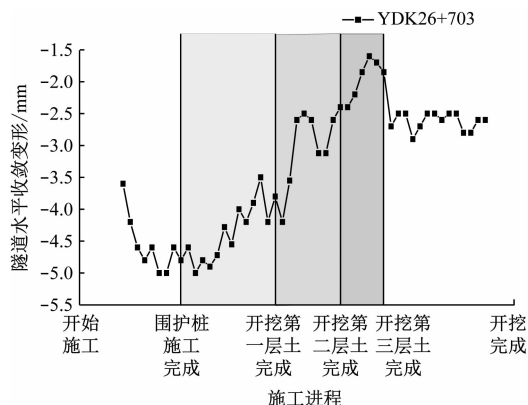
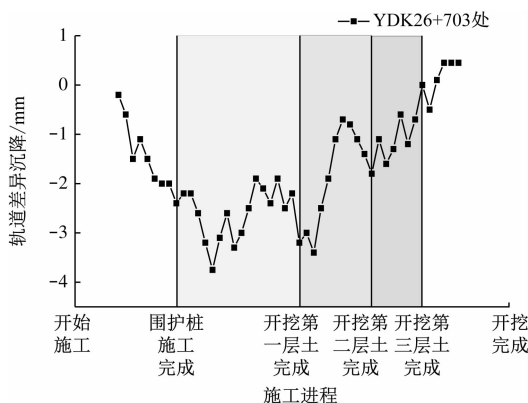


图 16 施工期间隧道水平收敛变形历时曲线

Fig. 16 Time history curve of tunnel horizontal convergence deformation during construction

图 17 为施工期间钢轨的差异沉降曲线。由图 17 可知:在完成围护桩施工之前,左右钢轨差异沉降增大,差异沉降最大值为2.4 mm;在第一层土方开挖期间,左右钢轨差异沉降先增大后减小,差异沉降最大值为3.7 mm;在开挖第二、三层土方时,差异沉降逐渐减小,并稳定在0.6 mm左右,且在安全控制范围内。



注:差异沉降=左轨沉降-右轨沉降。

图 17 施工期间钢轨的差异沉降曲线

Fig. 17 Vertical relative deformation curve of track during construction

5 结论

1) 基坑近邻隧道所处的地层条件会影响隧道变形。在3个计算断面中,断面3-3所处地层整体性较差,故该位置基坑开挖对隧道的影响较大。

2) 基坑放坡开挖过程中,与拉槽放坡开挖相比,普通放坡开挖引起的隧道竖向变形较小;与整层开挖相比,接续开挖引起的隧道竖向变形较小;不同工况的竖向变形最终结果较接近。

3) 与接续开挖相比,整层开挖引起隧道的水平位移和竖向位移均较大。这主要是由于开挖步序多,基坑的时空效应明显导致。综合考虑实际施工变形要求与工期要求,采用接续开挖更优。

4) 由现场实际监测数据可得:隧道结构先沉降,后因开挖卸载逐渐恢复;隧道结构水平收敛先增大,后因地层揭露引起左右拱腰的变形速率存在差异而逐渐减小;左右钢轨的差异沉降先增大后减小,且在安全控制范围内。

参考文献

- [1] 冯国健. 紧邻深大长基坑的地铁结构保护对策与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(1): 103.
FENG Guojian. Protection countermeasures for metro structure adjacent to deep and large foundation pit[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(1): 103.
- [2] 陈辉. 超大深基坑开挖对临近地铁隧道影响分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 90.
CHEN Hui. Analysis of the influence of excavation of super-large deep foundation pit on adjacent subway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(10): 90.
- [3] 吴才德, 曾婕, 成怡冲, 等. 深基坑开挖空间效应对周围土体及邻近隧道的影响研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 91.
WU Caide, ZENG Jie, CHENG Yichong, et al. Influence study of spatial effect of deep foundation pit excavation on around soil and adjacent tunnel[J]. Building Structure, 2016, 46(2): 91.
- [4] 林杭, 陈靖宇, 郭春, 等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响范围的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4240.
LIN Hang, CHEN Jingyu, GUO Chun, et al. Numerical analysis on influence of foundation pit excavation on deformation of adjacent existing tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4240.
- [5] 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.
ZHENG Gang, ZHU Hehua, LIU Xinrong, 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.
- [6] 周泽林, 陈寿根, 涂鹏, 等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1440.
ZHOU Zelin, CHEN Shougen, TU Peng, et al. Coupling method for analyzing the influence on existing tunnel due to adjacent foundations pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,

- 39(4): 1440.
- [7] 石钰锋, 方焘, 王海龙, 等. 基坑开挖引起紧邻地铁隧道力学响应与处理方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(6): 1100.
- SHI Yufeng, FANG Tao, WANG Hailong, et al. Research on mechanical response and countermeasures of subway tunnel induced by adjacent excavation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(6): 1100.
- [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.
- ZHANG Zhiguo, BAI Qiaomu, JIANG Yunjuan, 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.
- [9] 马永峰, 周丁恒, 曹力桥, 等. 临近地铁隧道的软土基坑施工分析及方案优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(5): 33.
- MA Yongfeng, ZHOU Dingheng, CAO Liqiao, et al. Analysis and scheme optimization of pit excavation adjacent to metro tunnels in soft ground[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(5): 33.
- [10] BEYABANAKI A R, GALL V. 3D numerical parametric study of the influence of open-pit mining sequence on existing tunnels[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(3): 459.
- 收稿日期:2022-01-01 修回日期:2022-02-24 出版日期:2024-06-10
Received:2022-01-01 Revised:2022-02-24 Published:2024-06-10
• 第一作者:杨革,高级工程师,287821359@qq.com
通信作者:徐前卫,副教授,xuqianewi@tongji.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 152 页)

- XIE Bingbing. Strain transfer mechanism and layout technology of distributed optical fiber for monitoring tunnel deformation[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019.
- [4] 梁斯铭, 谢长岭, 蒋儿, 等. 分布式光纤技术在隧道变形监测中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊1): 436.
- LIANG Siming, XIE Changling, JIANG Er, et al. Application of distributed optical fiber technology in tunnel deformation monitoring[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S1): 436.
- [5] 魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG 在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 571.
- WEI Guangqing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 571.
- [6] 杨玉坤, 王新. FBG 应变传感器在盾构隧道监测中应用[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(2): 95.
- YANG Yukun, WANG Xin. The application of FBG strain sensors in the monitoring of shield tunnels[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(2): 95.
- [7] 沈圣, 吴智深, 杨才千, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的盾构隧道横截面收敛变形监测方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 104.
- SHEN Sheng, WU Zhishen, YANG Caiqian, et al. Convergence deformation monitoring of shield tunnels based on distributed optical fiber strain sensing technique[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 104.
- 收稿日期:2021-12-21 修回日期:2022-03-15 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-21 Revised:2022-03-15 Published:2024-06-10
• 通信作者:代兴云,工程师,daixy@chinacuc.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

