

邻近基坑开挖顺序对既有隧道的变形影响分析

朱国权¹, 陆 幸², 司壹恒³, 叶俊能²

(1.中化地质矿山总局浙江地质勘查院, 浙江 杭州 310002; 2.宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315010;
3.宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要:以邻近轨道交通2号线鼓外区间隧道的宁波绿地中心项目基坑为案例,研究了基坑开挖对隧道水平位移、结构沉降、道床沉降的影响规律,并利用 PLAXIS 程序分析了基坑分坑、分块开挖顺序对隧道变形的影响。结果表明:对隧道变形影响较大的是基坑与隧道之间的距离以及基坑分坑面积的大小,两者呈线性关系;开挖面积越大,隧道变形越大;基坑与隧道之间的距离越大,变形越小。邻近轨道交通的基坑开挖时,应先远坑后近坑,先小坑后大坑,并采取跳挖的施工顺序。具体研究成果可以为类似工程提供借鉴。

关键词: 基坑开挖; 隧道保护; 现场试验; PLAXIS; 隔离桩

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 05-0089-06

随着我国城市化进程的发展,城市中人口密集,土地资源有限,不可避免会出现新建建筑物与既有地下交通隧道紧邻的情况。常见基坑都具有开挖区域宽广,开挖深度大以及周边地下环境状况复杂的特点^[1],而地铁隧道作为重要的运输方式也有着严格的保护要求^[2],因此如何在近接隧道的基坑施工过程中,严格控制基坑自身安全及隧道变形已经成了岩土学者密切关注的技术难题之一。

Sharma 等^[3]通过实验发现开挖施工过程中引起隧道水平位移朝向基坑侧,竖向位移向地面侧,其中最大水平位移发生在隧道顶部,最大竖向位移发生在靠近基坑一侧。况龙川等^[4]研究发现隧道竖向位移方向与其周边土体位移相关,且基坑开挖造成隧道周边地应力是在不断变化的。陈郁等^[5]通过现场试验发现基坑开挖导致坑底土体应力场发生变化,从而发生坑底土体回弹,造成隧道产生向地面侧的竖向变形。孔令荣等^[6]提出隧道结构的位移变形主要受基坑与隧道间的相对距离以及开挖过程中时空效应两方面的影响。邵华等^[7]发现对隧道影响最大的因素是基坑围护结构的变形和基坑坑底土体回弹隆起,考虑到时空效应的影响,提

出对基坑进行分区顺序开挖,可有效地控制隧道结构的位移变形。伍尚勇等^[8]利用 Midas/GTS 研究了既有隧道两侧深基坑在不同开挖顺序施工时,对隧道结构内力和位移变形的影响。左殿军等^[9]选用了 ABAQUS 数值模拟软件,研究基坑近接开挖施工对既有隧道的扰动影响。刘方梅^[10]则选取了 HSS 土体计算模型来研究基坑和既有隧道的空间位置、基坑分区开挖、隧道周边土体扰动、地下水水位和单双基坑同时开挖施工等多种工况下对隧道结构的影响。王罡^[11]利用 ANSYS 有限元分析软件分析了基坑开挖对隧道结构变形的扰动规律,提出了隧道结构变形的控制标准。郑刚等^[12]、杜一鸣^[13]通过有限元方法研究了隔离桩对基坑的牵引作用,提出了最佳的隔离桩桩头埋深。此外,魏少伟^[14]、王强^[15]、林杭等^[16]都运用有限元对不同工况下基坑开挖对邻近隧道的影响进行了研究。

本文以宁波轨道交通 2 号线鼓外区间侧方近接的绿地中心深基坑工程为案例,采用现场试验与数值模拟的方法,研究了深基坑开挖过程中对既有运营隧道的变形影响规律,并探讨了基坑开挖顺序和隔离桩设置方式的影响,可为类似工程

提供参考.

1 基坑开挖对隧道影响测试

1.1 工程概况

宁波绿地中心项目基坑面积约 41 000 m², 周长 885 m. 基坑采用分区顺作开挖方式, 被划分为 6 个区域开挖, 其中 II 区又被划分为 5 个基坑, 共 10 个基坑, 分阶段进行开挖(图 1). 基坑开挖顺序如下: I 区→III 区→II-D 区→IV 区、V 区→II-E 区→II-A 区→II-B→II-C 区→VI 区. 在前个区域地下室结构施工完成后, 才可进行下个区域的基坑开挖.

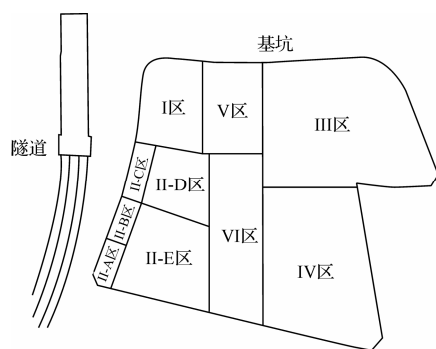


图 1 基坑与隧道平面位置关系示意图

鼓外区间隧道直径为 6.2 m, 中心距为 13.8 m, 隧道顶埋深约 9 m, 底埋深约 15.2 m, 隧道位于基坑西北侧, 距离绿地中心地下室最近距离约为 11.5 m. 由于本项目距轨道交通 2 号线鼓外区间隧道较近(图 1), 地铁保护工作要求较高. 在基坑开挖过程中, 对隧道水平位移、隧道沉降、道床沉降等进行监测.

对鼓外区间隧道进行测点布设, 隧道内每 5 环(6 m)布设 1 个监测断面, 上行线隧道共布设 22 个监测点(图 2).

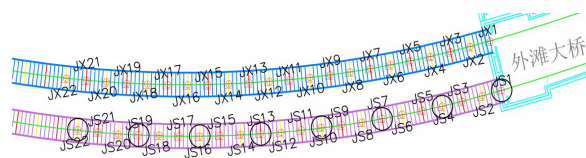


图 2 监测结果分析所选取数据点示意图

1.2 测试结果

1.2.1 隧道水平位移

图 3 为基坑各分区开挖完成后隧道拱顶水平位移变化图. 隧道水平位移随着各区域开挖, 整体

增大, 位移最大出现在 DMS-13C 的位置, 最大水平位移为 14.6 mm. 隧道结构水平位移主要受 I 区和 II 区开挖影响较大. 前期 I 区、III 区施工时, 隧道前部靠近该区域的部分水平位移增加较大, 其余部分变形较小. II 区各分基坑施工时隧道中部靠近该基坑的部分水平位移增加较大, 其中 II-E 区、II-B 区、II-C 区的 3 个距离隧道较近的分基坑开挖时, 隧道水平位移增量最大; 而隧道的后部由于距离基坑相对较远, 因此水平位移整体变化不大, 且在基坑施工的后期发生了回弹.

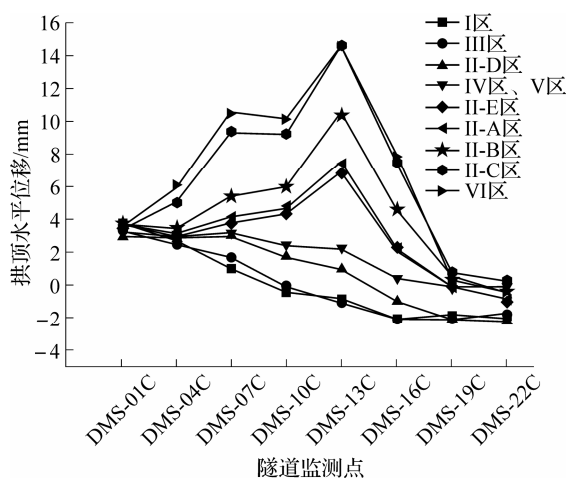


图 3 分区开挖完成后隧道拱顶水平位移变化

图 4 为 DMS-13C 点位移时程图. 由图可见, 在 I 区及 III 区开挖完毕后, 该监测点处隧道水平位移为负值, 即位移趋向于远离基坑方向; 在 II-D 区开挖施工后, 隧道该点处才开始向基坑侧发生水平位移, 并随着其余各基坑的开挖而逐渐增加; 其中水平位移增量最大的施工阶段为 II-E 区、II-B 区、II-C 区的 3 处分基坑的开挖施工, 位移增量均在 3 mm 以上, 这 3 个分基坑在空间关系上与隧道距

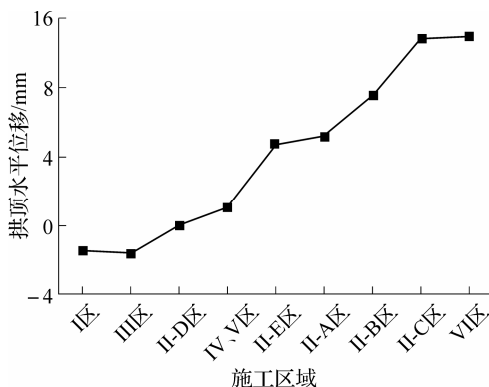


图 4 最大位移点时程变化

离最近,且在II-E区进行施工开挖时,水平位移增量最大,达到4.3 mm。

1.2.2 隧道沉降

图5和图6分别为各分区开挖完成后隧道拱顶、拱底沉降变化图。由图可见,隧道拱顶沉降和拱底沉降变化趋势基本一致,且都随着基坑区域的开挖而逐渐增大,拱顶最大沉降出现在DMS-13C处,最大拱顶沉降为-25.8 mm;拱底沉降最大出现在JS-13D处,最大拱底沉降为-25.0 mm,最终隧道拱顶沉降量略大于拱底沉降。

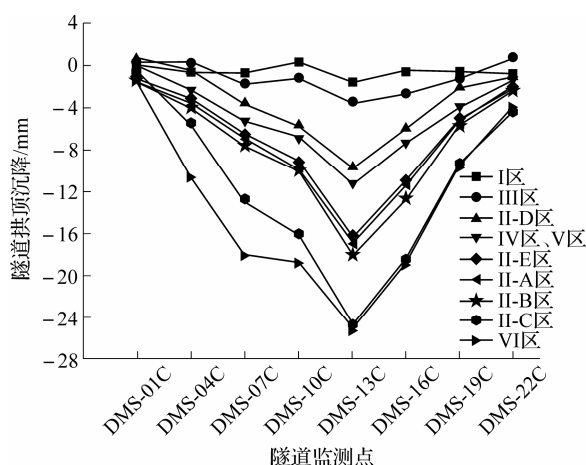


图5 分区开挖完成后隧道拱顶沉降变化

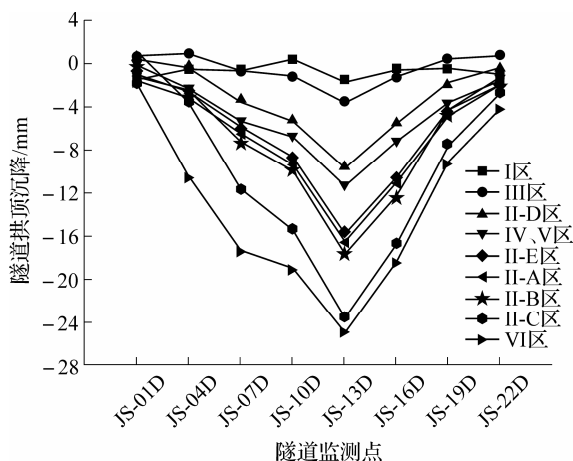


图6 分区开挖完成后隧道拱底沉降变化

在各区域分阶段开挖施工中,在开挖如III区、II-D区、II-E区面积较大的分基坑时,隧道沉降变化量也相对较大。

图7为拱顶、拱底沉降时程变化图。可见隧道拱顶与拱底的下沉量随各个基坑的开挖施工中逐渐增加,且整个基坑开挖过程中,隧道拱顶沉降始终大于拱底沉降。在图中沉降变化量较大施工区

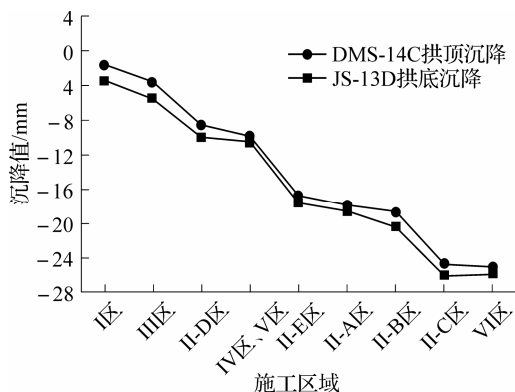


图7 拱顶、拱底沉降时程变化

域为III区、II-D区、II-E区以及II-C区。其中II-C区分基坑施工过程中沉降量变化值较大,是因为隧道与该区域基坑距离较近,III区虽然与隧道距离较远,但由于其开挖面积较大,隧道沉降也较大,II-D和II-E区开挖面积大,隧道沉降也大。

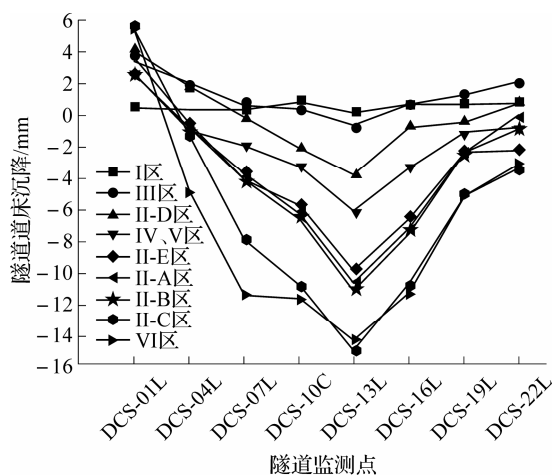


图8 分区开挖完成后隧道左侧道床沉降变化

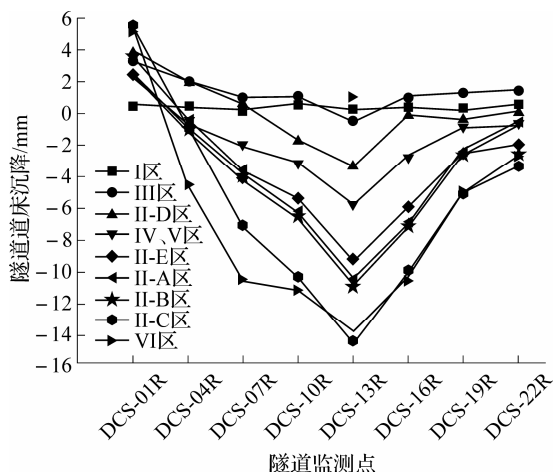


图9 分区开挖完成后隧道右侧道床沉降变化

1.2.3 道床沉降

在图8和图9分别为隧道左线和右线道床沉降变化图. 由图可见, 随着各分区基坑的开挖, 道床沉降逐渐增大, 左右线变化趋势基本一致, 最大沉降均出现DCS-13测点处, 左侧隧道沉降最大值为-14.6 mm, 右侧隧道沉降最大值为-13.9 mm. 在各区域分阶段开挖施工中, 开挖面积较大的分基坑如II-D区、II-E区等开挖时, 隧道的道床沉降变化量也较大, 可见道床沉降除了与基坑和隧道距离有关之外, 与基坑面积也有关.

2 基坑开挖顺序对隧道影响有限元模拟

对于邻近轨道交通的基坑开挖是先远坑后近坑, 还是先近坑后远坑有一定的争论. 为此, 本节采用有限元方法讨论基坑分区、分块开挖顺序对隧道变形的影响. 通过设置4个新的工况(表1)与原开挖工况(工况一)的计算结果进行对比, 分析开挖

顺序对既有隧道变形的影响.

2.1 模型的建立

采用PLAXIS 3D模拟宁波绿地中心基坑开挖顺序对隧道影响. 模型尺寸为长400 m, 宽330 m, 深度55 m, 初始地下水位为地下1.9 m. 模型边界条件为底部完全约束, 上表面为自由面, 其他面约定其法向位移. 网格划分如图10所示, 总体网格密

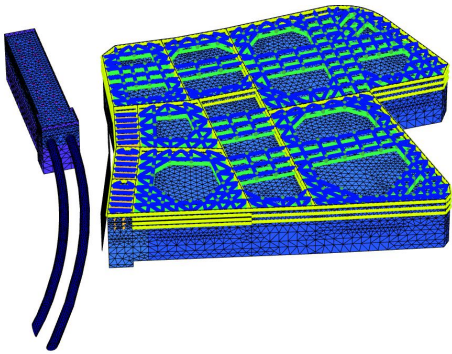


图10 有限元模型

表1 不同工况各施工阶段开挖区域

工况	施工阶段一	施工阶段二	施工阶段三	施工阶段四	施工阶段五	施工阶段六	施工阶段七
工况一	I、III区	II-D区	IV、V区	II-E区	II-A区	II-B区	II-C、VI区
工况二	IV、V区	II-E区	II-A区	II-B区	II-C、VI区	I、III区	II-D区
工况三	II-C、VI区	II-B区	IV、V区	II-E区	II-A区	I、III区	II-D区
工况四	II-C、VI区	IV、V区	II-E区	II-A区	II-B区	I、III区	II-D区
工况五	IV、V区	II-E区	II-A区	II-C、VI区	II-B区	I、III区	II-D区

表2 土体HSS模型参数

土名	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	$E_{\text{ref},50}/\text{MPa}$	$E_{\text{ref},\text{wed}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ref},\text{ur}}/\text{MPa}$	$G_{\text{ref},0}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$	ν_{ur}	$p_{\text{ref}}/\text{kPa}$	K_0	m
杂填土	5	15	0	8	8	24	30	1.0	0.2	100	0.78	0.8
黏土	16.2	30	0	9	9	27	80	1.0	0.2	100	0.79	0.5
淤泥质黏土①	11	23	0	2.5	2.95	10.5	25	1.0	0.2	100	0.70	0.8
淤泥质黏土②	10.1	26	0	3.5	3.5	10.5	31.5	1.0	0.2	100	0.71	0.5
粉质黏土①	27.6	32	0	14	14	42	80	1.0	0.2	100	0.73	0.8
粉质黏土夹粉土	25.6	28	0	11	11	35	90	1.0	0.2	100	0.83	0.8
粉质黏土②	22.1	30	0	12.4	12.4	37.2	56	1.0	0.2	100	0.70	0.8
黏土	1.2	32	0	18	18	54	110	1.0	0.2	100	0.70	0.5
粉砂	21	24	0	15	15	50	120	1.0	0.2	100	0.70	0.7
加固体	18	25	0	11	11	33	30	1.0	0.2	100	0.70	0.8

度为中等,网格单元数 608 747,节点数为 852 553. 土体共划分为 9 层,采用 HSS 本构模型,具体参数见表 2. 每层土体深度分别为 2.6、1.3、4.0、13.7、7.4、5.1、9.5、3.1、8.3 m,土层总深度为 55 m.

基坑近隧道侧采用 1 000 mm 厚、埋深 46 m 地下连续墙,其他边采用 800 mm 厚、埋深 41 m 地下连续墙,墙体的弹性模量 $3.00 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比 0.2;模型中隧道厚度 0.35 m,采用板单元,其弹性模量 $3.00 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比 0.2.

2.2 模拟结果及分析

2.2.1 模型验证

将工况一的模拟结果与现场实测结果进行对比(图 11 和 12 所示),可以看出,计算模拟结果与实测结果基本吻合.在前期 I、III 区、II-D 区以及 IV、V 区分基坑进行开挖时,实测结果与模拟结果接近,验证了模型的合理性.

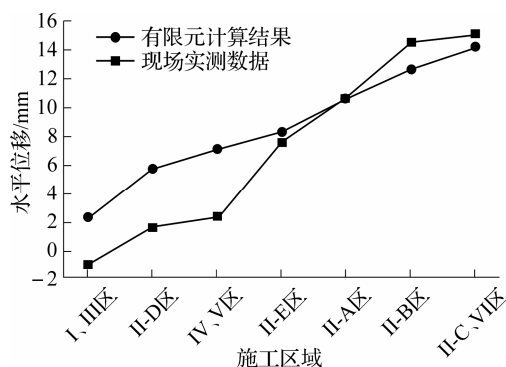


图 11 隧道水平位移对比

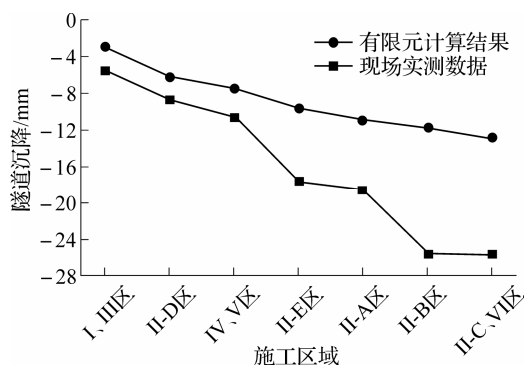


图 12 隧道沉降对比

在 II-E 区分基坑开挖阶段,轨道交通开始运营,给隧道带来了较大的影响,故 II-E 区后续施工引起的隧道沉降结果大于模拟结果.

2.2.2 分区开挖顺序影响

按表 1 各工况给定的顺序对基坑进行挖,隧道

水平位移、沉降计算结果如图 13 和图 14 所示.对比所有工况的位移变化,工况五最终累计位移均小于其他工况,且除了开挖阶段二之外,其余 3 个阶段增量位移也都小于其他工况中对应阶段的位移增量.将工况五与工况一进行对比发现,将引起隧道变形最大的阶段一安排在最后施工可以有效地减小隧道变形.

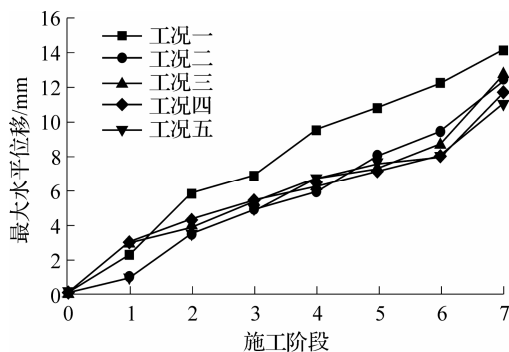


图 13 不同施工顺序时隧道水平位移对比

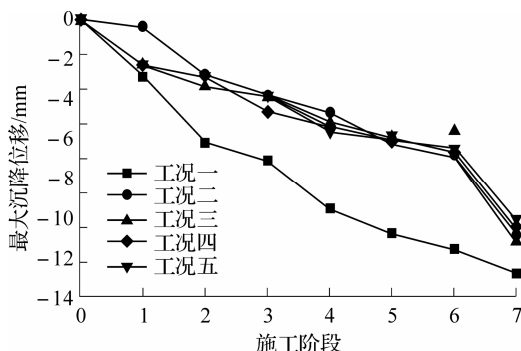


图 14 不同施工顺序时隧道沉降位移对比

将工况五与工况四进行对比,将距离隧道最近的 II-C 区分基坑安排在距离基坑相对较远的 II-A 区分基坑之后进行施工时,隧道累计位移变形较小.将工况五与工况二进行对比分析,根据其计算结果可知,距离既有隧道最近的 II-A 区、II-B 区、II-C 区在分隔开挖时,隧道累计位移变形较小.综上,邻近轨道交通的基坑开挖时,应先远坑后近坑,先小坑后大坑,并采取跳挖的施工顺序.

3 结论

(1)基坑开挖完成后,既有隧道的最大水平位移、最大沉降均发生在与基坑距离最小处,且隧道拱顶沉降较拱底沉降大.

(2)隧道沉降与道床沉降受基坑分块、分区开

挖区域面积的影响较大,两者关系呈正相关,即开挖区域基坑面积越大,隧道沉降和道床沉降变形增量越大。

(3)邻近轨道交通的基坑开挖时,应先远坑后近坑,先小坑后大坑,并采取跳挖的施工顺序。

参考文献:

- [1] Osman A S, Bolton M D. Ground movement predictions for braced excavations in undrained clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(4):465-477.
- [2] 基坑工程手册编辑委员会. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] Sharma J S, Hefny A M, Zhao J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(2):93-98.
- [4] 况龙川, 李智敏, 殷宗泽. 地下工程施工影响地铁隧道的实测分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000(S1): 79-82.
- [5] 陈郁, 张冬梅. 基坑开挖对下卧隧道隆起的实测影响分析[C]. 全国城市地下空间学术交流会, 上海, 2004.
- [6] 孔令荣, 崔永高, 隋海波. 基坑开挖对邻近地铁变形的影响分析[J]. 工程勘察, 2010, 38(6):15-20.
- [7] 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(S1):1403-1408.
- [8] 伍尚勇, 杨小平, 刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1):3452-3458.
- [9] 左殿军, 史林, 李铭铭, 等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 391-395.
- [10] 刘方梅. 深基坑开挖对邻近地铁隧道的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [11] 王罡. 基坑开挖施工对邻近运营地铁隧道变形影响分析[J]. 施工技术, 2016, 45(20):86-90.
- [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.
- [13] 杜一鸣. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响及保护研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [14] 魏少伟. 基坑开挖对坑底已建隧道影响的数值与离心试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [15] 王强. 敏感环境下深大基坑开挖实测分析及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2):98-101.
- [16] 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):4240-4247.

The influence of construction sequence of adjacent foundation pit on the deformation of existing tunnel

ZHU Guoquan¹, LU Xing², SI Yiheng³, YE Junneng²

(1.Zhejiang Geological Prospecting Institute of CCCGMB, Hangzhou 310002, China; 2.Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315010, China; 3.Institution of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the foundation pit of Ningbo Greenland Center Project, which is adjacent to the Guwai interval tunnel of Rail Transit Line 2, the influence of foundation pit excavation on the horizontal displacement, structural settlement and roadbed settlement of the tunnel are studied in this paper. The PLAXIS program is employed to analyze the influence of the excavation sequence of foundation pit and block excavation on the deformation of the tunnel. The results show that the distance between the foundation pit and the tunnel and the area of the foundation pit are the most important factors affecting the deformation of the tunnel. There is a linear relationship between the two. The larger the excavation area is, the larger the tunnel deformation is. The greater the distance between the foundation pit and the tunnel, the smaller the deformation. Hence the construction sequence of the adjacent foundation pits should be arranged from far away to near, from small to big, and better adopting jump interval excavation. The results of this paper can be used as a reference for similar projects.

Key words: excavation; tunnel protection; field test; PLAXIS; isolation pile

(责任编辑 章践立)