

平行双基坑同步开挖引起邻近地铁盾构隧道变形监测分析

刘凤华

(上海隧道工程有限公司, 200082, 上海)

摘要 [目的] 双基坑同步开挖会对邻近地铁盾构隧道造成影响。为了保障邻近盾构隧道的稳定性,需对平行双基坑同步开挖引起的邻近盾构隧道的变形规律进行监测分析。[方法] 以杭州地铁6号线江汉路站为工程背景,基于隧道竖向位移、水平位移及收敛变形等现场监测数据,分析平行双基坑同步开挖对邻近盾构隧道的影响,探究施工风险节点。[结果及结论] 基坑长边效应及其卸载应力集中导致基坑中部的隧道水平位移较两侧都大,先开挖区土体的扰动随着后开挖基坑的施工逐步叠加,使得隧道最大水平位移发生在基坑的后开挖区;隧道竖向位移曲线由于双基坑同步开挖、架设支撑、浇筑坑底,而形成两处波峰、一处波谷的特征;在邻近基坑偏心卸载作用下,隧道横截面收敛变形呈横鸭蛋形;双基坑平行于盾构隧道同步开挖,产生叠加效应,进一步加剧隧道的变形发展;基坑分区、分层的开挖方式能较好地利用时空效应,减少基坑的暴露时间,有效限制坑底土体的回弹,大大减小土体的隆起。合理采取分区分层、限时开挖,及时架设支撑,以及浇筑钢筋混凝土基础底板等措施,可以有效减小双基坑开挖对邻近盾构隧道的影响。

关键词 地铁; 盾构隧道; 变形监测; 平行双基坑; 基坑开挖

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.009

Monitoring and Analysis of the Adjacent Metro Shield Tunnel Deformation Caused by Simultaneous Excavation of Parallel Double Foundation Pits

LIU Fenghua

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., 200082, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Simultaneous excavation of double foundation pits will affect the adjacent metro shield tunnel. In order to ensure the stability of the adjacent shield tunnel, it is necessary to monitor and analyze the deformation law of the above tunnel caused by simultaneous excavation of parallel double foundation pits. [Method] With Jiangnan Road Station of Hangzhou Metro Line 6 as the engineering background,

based on the on-site monitoring data of tunnel vertical displacement, horizontal displacement and convergence deformation, the effect of the simultaneous excavation of parallel double foundation pits on the adjacent shield tunnel is analyzed, and the construction risk nodes are explored. [Result & Conclusion] The long side effect of foundation pit and the concentration of unloading stress cause a larger horizontal displacement of the tunnel in the middle of the foundation pit than that on both sides of the pit. The disturbance of the soil in the early excavation area gradually superimposes with the construction of the later excavation foundation pit. As a result, the maximum horizontal displacement of the tunnel occurs in the later excavation area. The vertical displacement curve of the tunnel is characterized by two peaks and one trough due to the simultaneous excavation, erection support and pouring of the pit bottom. With the effect of eccentric unloading of the adjacent foundation pit, the convergence deformation of tunnel cross-section turns into a traverse duck egg-like shape. The simultaneous excavation of the double foundation pits paralleling to the shield tunnel produces superposition effect, and further aggravates the deformation development of the tunnel. The partitioned and layered excavation method can make good use of time and space, reduce the exposure time of foundation pit, effectively limit the rebound of soil at the bottom of the pit, thus greatly reduce the uplift of soil. Reasonable measures such as partitioning and layering, time-limited excavation, timely erection of support, and pouring reinforced concrete foundation plate can effectively reduce the influence of double foundation pit excavation on the adjacent shield tunnel.

Key words metro; shield tunnel; deformation monitoring; parallel double foundation pit; foundation pit excavation

随着城市化进程的加快,城市轨道交通(以下简称“城轨”)迅速发展,邻近城轨隧道的基坑工程日益增多,多基坑近接城轨隧道施工的工况也愈发常见^[1-2]。文献[3]基于大量工程实测资料,采用有限元方法对基坑施工引起隧道变形的影响规律进

行了分析,并划分了基坑施工影响区域。文献[4-6]采用不同简化方法,从理论计算角度分析了基坑开挖诱发邻近盾构隧道的变形规律。文献[7]基于实测数据分析了基坑施工过程中深层土体侧移与邻近隧道变形之间的规律。文献[8]通过数值模拟分析了双基坑不同施工阶段对地铁隧道变形的影响,发现双基坑与隧道平行布置时,隧道会发生较大变形,且后开挖基坑引起的变形较先开挖基坑约大7%。文献[9]指出两基坑对称开挖相较于不对称开挖能更好地控制隧道水平位移,但对于邻近隧道竖向位移的控制相对不利。不难发现,有关多基坑平行开挖产生叠加效应的实测数据研究尚不多见,特别是考虑到多次施工扰动后邻近盾构隧道的变形规律仍未见报道。

因此,本文基于实测数据,探究平行双基坑开挖过程中邻近盾构隧道的竖向位移、水平位移及收敛变形的变化规律,并结合施工日志对基坑开挖应力集中以及双基坑开挖叠加效应进行分析,提出施工风险节点。

1 工程概况

1.1 项目概况

江汉路站是杭州地铁6号线(以下简称“6号线”)一期工程的中间站,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A出入口基坑深度为10.3~13.6 m,土方开挖量约为7 780 m³,2号风亭基坑深度为10.2~12.2 m,土方开挖量约为4 515 m³,围护结构均采用

厚800 mm、深35.0 m的地下连续墙,结合1道混凝土支撑+2道钢支撑的形式,采用明挖法施工。

江南大道改造提升工程区间为地下盾构隧道,位于江南大道下方,与6号线并行。盾构隧道外径为11.36 m,内径为10.36 m;管片环宽为2.0 m,厚度为500 mm。管片环分为8块,即5块标准块、2块邻接块和1块封顶块。管片混凝土强度等级为C50,抗渗等级为P12。

盾构北线邻近江汉路站附属结构,平面位置关系如图1所示。按照施工计划,江汉路站附属结构施工前,南北两侧盾构均已完工。北侧盾构隧道距离A号出入口地连墙最小侧向净距约为2.4 m,盾构顶标高为-12.33 m,基坑底最小标高为-6.514 m。北侧盾构隧道距离2号风亭地连墙最小侧向净距约1.7 m,盾构隧道顶标高为-14.958 m,基坑底最小标高为-5.788 m。北侧盾构隧道与车站附属结构基坑基本平行且间距较小,剖面位置关系如图2所示。

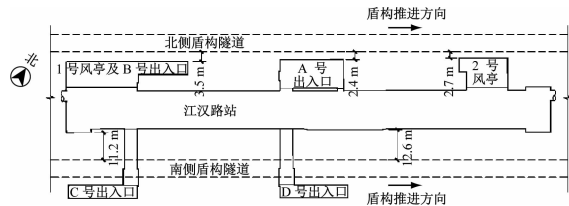


图1 江汉路站附属结构与北侧盾构隧道的平面位置关系图

Fig.1 Plane position relationship drawing of the ancillary structure of Hanjiang Road Station and the shield tunnel in the north

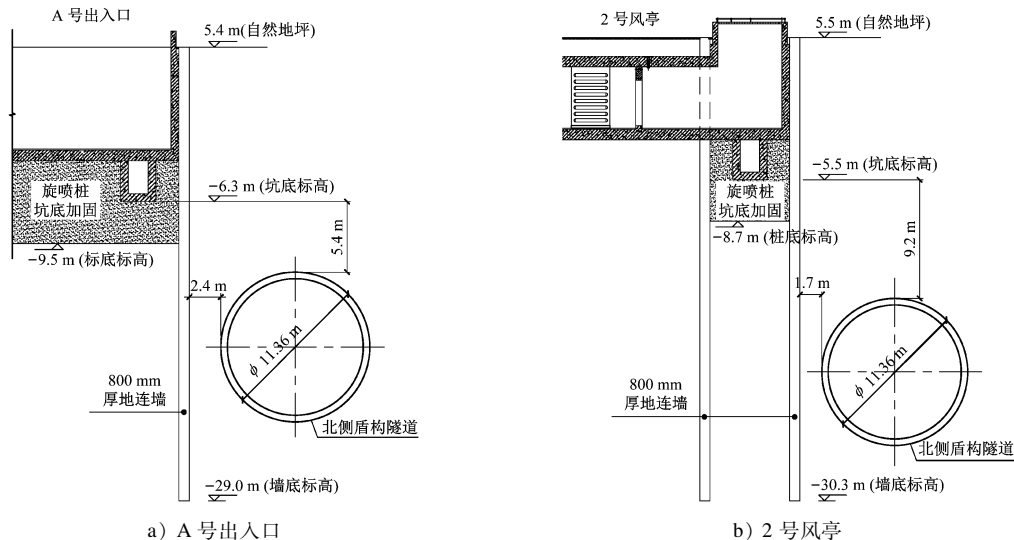


图2 江汉路站附属结构与北侧盾构隧道的剖面位置关系

Fig.2 Profile of the ancillary structure of Hanjiang Road Station and the shield tunnel in the north

1.2 工程地质条件

江汉路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。盾构隧道所处地层主要为砂质粉土夹粉砂、砂质粉土、淤泥质粉质黏土及粉质黏土。北侧盾构隧道工程地质断面如图3所示。

1.3 基坑施工工况

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的时间和空间。A号出入口采用东西两段分区、分层开挖的方式,2号风亭采用整体分层开挖的方式。基坑施工工况详见表1。

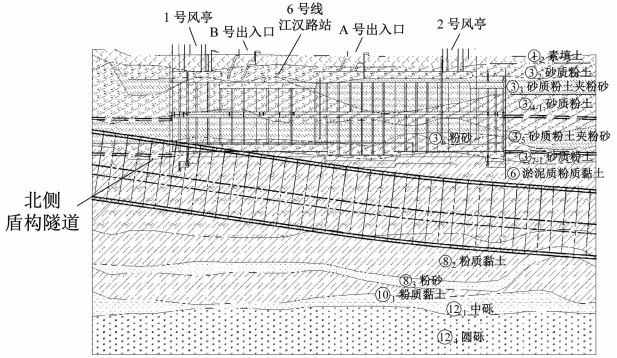


图3 北侧盾构隧道工程地质断面图

Fig.3 Sectional map of engineering geology of the shield tunnel in the north

表1 基坑施工工况

Tab.1 Construction conditions of the foundation pit

工况序号	施工日期	具体施工内容
一	2020-06-06—2020-06-08	A号出入口东半侧第一层土体开挖,钢支撑架设
二	2020-06-09—2020-06-10	A号出入口西半侧第一层土体开挖,钢支撑斜支座安装,东半侧斜撑架设
三	2020-06-13	A号出入口西半侧斜撑架设,2号风亭第一层土体开挖
四	2020-06-14—2020-06-15	A号出入口第二层土体分区开挖
五	2020-06-17—2020-06-18	A号出入口钢支撑架设
六	2020-06-19—2020-06-23	A号出入口第三层土体分区开挖,底板浇筑,2号风亭钢支撑架设
七	2020-07-01	2号风亭最后一层土体开挖
八	2020-07-02—2020-07-03	2号风亭底板浇筑

1.4 北侧盾构隧道变形监测

北侧盾构隧道监测范围选取第130环—第155环,每5环管片设置1个监测断面。对其进行竖向位移、水平位移及水平收敛变形监测。北侧盾构隧道与基坑平面位置关系详见图4。

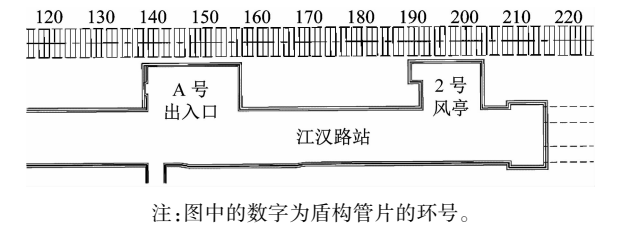
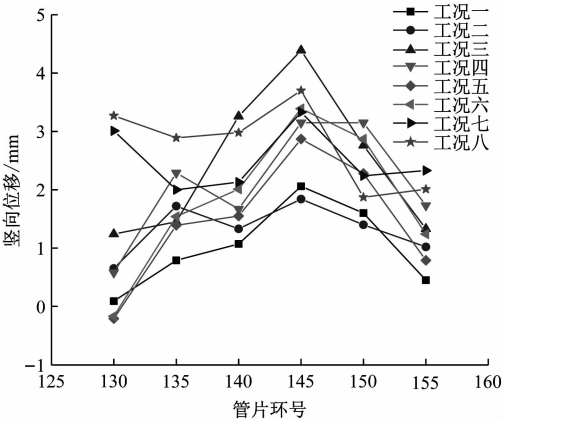


图4 北侧盾构隧道与基坑平面位置图

Fig.4 Plan location of the shield tunnel in the north and the foundation pit

变形以隆起为主,隆起量为 $-0.5 \sim 4.5$ mm。究其原因,为侧上方基坑开挖卸载,导致坑底土体产生回弹变形,继而引起隧道的隆起^[10]。随着开挖深度的增加,隧道竖向隆起也随之增加。特别地,第145环



注:正值表示隆起,负值表示沉降。

图5 隧道竖向位移-管片环号关系曲线

Fig.5 Graph of tunnel vertical displacement-segment ring number

2 盾构隧道变形监测结果分析

2.1 隧道竖向位移

隧道竖向位移-管片环号关系曲线如图5所示。由图5可见:江汉路站附属结构基坑开挖期间,隧道

管片的竖向隆起相比其他要大,最大值达到 4.5 mm。这是由于第 145 环管片位于 A 号出入口基坑的中部附近,基坑长边效应及其卸载应力集中导致其中部的隧道位移较两边都大^[8]。此外,隧道纵向东侧的竖向位移较大,这是由于东侧 2 号风亭与 A 号出入口的基坑平行施工对隧道的竖向变形存在叠加效应影响。

图 6 为不同施工节点下隧道的竖向位移-时间关系曲线。由图 5 和图 6 可知:工况一下 A 号出入口东侧第一层土体开挖引起的隧道最大竖向隆起为 2.06 mm,发生在第 145 环管片。A 号出入口西侧第一层土体开挖引起的隧道最大竖向隆起为 1.73 mm,发生在第 135 环管片;而东侧土体开挖对应的第 145 环与第 150 环管片略有沉降,这体现了基坑开挖的应力集中现象。A 号出入口基坑单独开挖时,隧道纵向各环管片的竖向位移变化较小,基本保持在 2.0 mm 以内。一旦 2 号风亭与 A 号出入口的基坑同步开挖,由于扰动剧烈,隧道竖向位移明显增大。

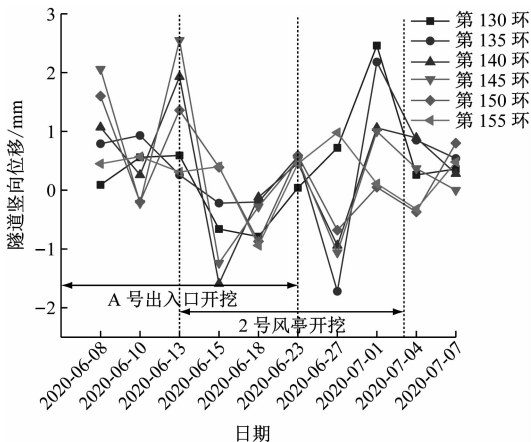


图 6 不同施工节点下隧道竖向位移-时间关系曲线

Fig. 6 Graph of vertical displacement time relationship of the tunnel under different construction nodes

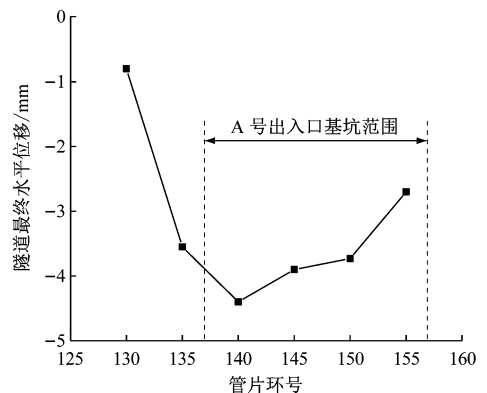
基坑采取架设支撑与浇筑底板均可以有效控制其变形的发展,如工况五和工况六中隧道竖向位移发生回落,隧道中部以沉降为主。直至 2 号风亭最后一层土体开挖,隧道竖向位移产生了较大波动,其中第 130 环管片处竖向最大隆起增量为 2.46 mm。随着 2 号风亭的底板浇筑,隧道竖向位移趋于平缓,不再产生超过 1.0 mm 的位移波动。

双基坑平行于隧道同步开挖过程中,隧道竖向受力情况较为复杂。不难看出,图 6 中近似有两处

波峰和一处波谷,即:先施工基坑开挖引起隧道变形,而后施工基坑开始同步开挖后,隧道竖向位移曲线产生一个波峰;当采取相应措施或先行施工基坑施工完毕后竖向位移得以控制,且稍有回落,曲线形成波谷。在后施工基坑单独开挖最后一层土体的过程中,同样因施工扰动造成位移增加,使得曲线形成波峰。

2.2 隧道水平位移

隧道纵向最大水平位移-管片环号关系曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出:隧道整体水平位移为朝向基坑方向移动,且基坑中部的隧道位移明显大于两侧,这同样也是由基坑中部的应力集中所导致,与竖向位移的规律一致。盾构隧道的最大水平位移约为 4.5 mm,发生在第 140 环管片,且整体曲线稍向西侧偏移。究其原因 A 号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的进行逐渐叠加至西侧的后开挖区,导致最大水平位移发生在基坑开挖的后开挖区,这与文献^[8]的研究结果相似。



注:水平位移正值代表远离基坑,负值代表朝向基坑。

图 7 隧道纵向最大水平位移-管片环号关系曲线

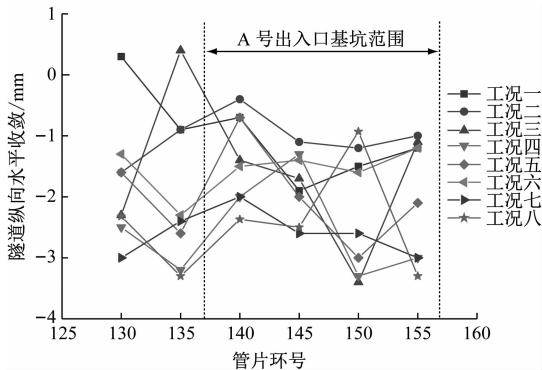
Fig. 7 Graph of tunnel longitudinal maximum horizontal displacement-segment ring number relationship

此外,第 135 环—第 150 环管片范围内隧道的最大水平位移均大于 3.0 mm 的预警值,但小于 5.0 mm 的警戒值。基坑开挖范围内隧道西侧的最大水平位移要大于东侧,这说明平行双基坑施工确实对邻近盾构隧道造成了一定影响,需引起足够重视。

2.3 隧道收敛变形

隧道纵向水平收敛-管片环号关系曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出:盾构隧道的收敛变形基本呈现水平向拉伸、竖向压缩的横鸭蛋形态,隧道管

片水平向直径明显变大。究其原因在于侧方基坑开挖对盾构隧道产生一个偏心卸载力,使得隧道受到指向基坑侧方的力,故隧道产生了侧向变形。



注:水平收敛正值代表管片横向直径变小,负值代表管片横向直径变大。

图8 隧道纵向水平收敛-管片环号关系曲线

Fig.8 Graph of tunnel longitudinal horizontal convergence deformation-segment ring number relationship

3 结论

1) 基坑长边效应及其卸载应力集中导致基坑中部的隧道水平位移较两侧都大。先开挖区土体的扰动随着后开挖基坑的施工逐步叠加,使得隧道最大水平位移发生在基坑的后开挖区。

2) 双基坑平行于盾构隧道同步开挖,产生叠加效应,进一步加剧隧道的变形发展。隧道竖向位移曲线由于双基坑同步开挖、架设支撑、浇筑坑底,以及基坑开挖最后一层土体而形成两处波峰、一处波谷的特征。

3) 在邻近基坑偏心卸载力的作用下,隧道横截面收敛变形呈横鸭蛋形。

4) 基坑分区分层的开挖方式,较好地运用了时空效应,减少了基坑的暴露时间,有效限制了坑底土体的回弹,大大减小了土体的隆起。基坑施工过程中,尤其是双基坑平行同步开挖应遵循限时的原则,减少各施工节点时基坑无支撑、少支撑的暴露时间,并及时架设支撑与浇筑底板。

参考文献

[1] 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.
DING Zhi, ZHANG Xiao, LIANG Fayun, 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.

[2] 郑刚,朱中华,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.

[3] 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.
ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 599.

[4] 应宏伟,程康,俞建霖,等. 考虑地基变形连续的基坑开挖诱发邻近盾构隧道位移预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 318.
YING Hongwei, CHENG Kang, YU Jianlin, et al. Prediction of shield tunnel displacement due to adjacent basement excavation considering continuous deformation of ground[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(2): 318.

[5] 魏纲,洪文强,魏新江,等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1251.
WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Calculation of rigid body rotation and shearing dislocation deformation of adjacent shield tunnels due to excavation of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1251.

[6] 梁荣柱,林存刚,夏唐代,等. 考虑隧道剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 223.
LIANG Rongzhu, LIN Cungang, XIA Tangdai, et al. Analysis on the longitudinal deformation of tunnels due to pit excavation considering the tunnel shearing effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 223.

[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.
DING Zhi, ZHANG Xiao, JIN Jieke, 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.

[8] 张治国,费思异,邢李. 双基坑开挖对邻近隧道结构变形影响分析[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(2): 176.
ZHANG Zhiguo, FEI Siyi, XING Li. Analysis on the influence of adjacent double foundation pit excavation on tunnel deformations[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2017, 39(2): 176.

[9] 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(增刊1): 3452.

方面:

1) 线网供给建模。在建立城轨线网客流分配模型时:手动方式下需在 VISUM 软件中创建对象,并为每类对象创建自定义属性并赋值,当需要进行方案比选时还需重复进行这些操作;而自动化计算程序可以自动地读取建模所需数据,并自动完成多方案的建模工作。

2) 线网需求建模。采用多个时段的 OD 矩阵进行交通分配,手动操作时需要逐一设置分配时段,并为每个时段添加矩阵。本程序可以自动按需读取需求矩阵并将其导入模型。

3) 结果输出与显示。在导出交通分配计算结果时:手动操作方式下每次分配后需在线网、线路、路段、车站等多个层面创建列表,并为每个列表选取不同的字段;本程序可以通过读取参数文件,按规则自动创建列表并导出至本地数据库。在绘制计算结果趋势图时:手动操作方式下需为每张图片设置图形样式,当需要显示多个属性时就会产生大量重复工作;本程序可以读取预设的图形参数,自动绘制各种类型的图片。

5 结语

本文研究了城轨线网客流分配的自动化计算方法,并通过软件二次开发编写了基于 VISUM 软件的城轨线网客流分配自动化计算程序。通过对实例的分析,采用该方法进行城轨线网客流分配评价指标的计算,不仅可以满足评价所需的复杂的分析计算要求,而且提高了评价工作的效率。

(上接第 53 页)

WU Shangyong, YANG Xiaoping, LIU Tingjin. Analysis of influence on deformation of adjacent subway tunnel due to bilateral deep excavations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3452.

[10] 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.

SHEN Wen, SHEN Rong, SUN Lianwei. Field monitoring and analysis on the influence of deep excavation on adjacent metro[J].

参考文献

- [1] 于剑, 徐彬. 面向客流分配的城市轨道交通服务网络建模方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(9): 92.
YU Jian, XU Bin. Modeling method of service network for passenger flow assignment in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(9): 92.
- [2] 马芳. 城市轨道交通客流分配研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
MA Fang. Research on passenger flow assignment of urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [3] 黄鉴, 蒋赛. 基于换乘网络的城市轨道交通客流分配模型[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(8): 1.
HUANG Jian, JIANG Sai. Passenger flow distribution model for urban rail transit based on transfer network[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(8): 1.
- [4] 孙剑, 李克平, 尹瑞, 等. 世博会客流活动仿真模型及决策评价研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(3): 418.
SUN Jian, LI Keping, YIN Rui, et al. Study on visitor activity simulation model and decision evaluation for EXPO 2010[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2009, 33(3): 418.

· 收稿日期:2021-08-09 修回日期:2022-05-28 出版日期:2024-03-10
Received:2021-08-09 Revised:2022-05-28 Published:2024-03-10
· 第一作者:臧天哲, 硕士研究生, zang_tianzhe@outlook.com
通信作者:顾保南, 教授, gbnnyh@163.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

Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 354.

· 收稿日期:2022-01-17 修回日期:2022-02-23 出版日期:2024-03-10
Received:2022-01-17 Revised:2022-02-23 Published:2024-03-10
· 作者:刘风华, 高级工程师, 2037542579@qq.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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821