

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.05.010

【工程应用】

复合地层双线隧道盾构施工地表位移分析

杨飞, 李嘉, 陈建军

(浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对杭州地铁3号线某盾构区间上软下硬复合地层位移进行监测, 并采用MIDAS/GTS软件模拟盾构开挖全过程, 研究盾构开挖引起复合地层的位移分布规律, 结果表明, 单线隧道施工时, 地表沉降大致符合Peck曲线分布, 区间双线隧道轴线间距为 $2.77D$ (隧道外径), 导致双线施工完成后地表沉降呈现“W”型曲线分布; 复合地层情况下地表沉降介于全部为硬层和软层之间。当软硬地层交界面位于隧道上方时, 随着交界面的下移, 最大沉降位移显著增大, 表明地表沉降主要由上部地层的位移构成, 上部地层的性质对地表位移影响显著。单线隧道施工时, 距离隧道轴线 $1.5D$ 处的水平位移达最大, 在距 $2.7D$ 处出现反弯点; 双线隧道施工时, 地表水平位移增大, 峰值位移增大24%; 后开挖隧道侧的峰值位移向后开挖侧移动 $2.6D$, 先开挖隧道侧的峰值位移向后开挖侧略微移动, 在双隧道中心处地层水平位移接近于0。

关键词: 盾构隧道; 监测; 复合地层; 地表沉降; 水平位移; 反弯点

中图分类号: TU455

文章标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0430-07

Analysis of surface displacement in shield construction of double-line tunnels in composite ground

YANG Fei, LI Jia, CHEN Jian-jun

(Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd., Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: The displacement of the upper soft and lower hard composite ground during tunneling of a shield interval of Hangzhou Metro Line 3 was monitored. The MIDAS / GTS software was used to simulate the whole process of shield excavation, and the distribution of the surface displacement of the composite ground caused by shield excavation was studied. The results show that during the construction of the single-line tunnel, the surface settlement roughly conforms to the Peck curve distribution, and the axial spacing of the double-line tunnel in the interval is $2.77D$ (where D is the outer diameter of the tunnel), resulting in the ‘W’-shaped curve distribution of the surface settlement after the completion of the double-line construction. In the case of composite strata, the induced surface settlement is between complete the hard layers and soft layers. When the interface between soft and hard strata is located above the tunnel, the maximum settlement displacement increases significantly with the downward of the interface, indicating that the surface settlement is mainly generated by of the displacement of the upper strata, and the properties of the upper strata have a significant influence on the surface displacement. During the construction of single-line tunnel, the horizontal displacement at a distance of $1.5D$ from the tunnel axis reaches the maximum value, and point of inflection occurs at a distance of $2.7D$. During the construction of the double-line tunnel, the horizontal displacement of the surface increases, and the peak displacement increases by 24%. The peak displacement of the post-excavation tunnel side moves $2.6D$ to the post-excavation side. The peak displacement of the first excavation tunnel side moves slightly to the post-excavation side, and the horizontal displacement of the stratum is close to 0 at the center of the double tunnels.

Key words: shield tunnel; monitoring; composite ground; surface settlement; horizontal displacement; point of inflection

收稿日期: 2022-03-10

作者简介: 杨飞 (1980—), 男, 湖北建始人, 本科, 高级工程师, 主要从事交通工程领域研究工作。E-mail: 14432692@qq.com。

0 引言

盾构法广泛应用于地铁隧道施工,由于盾构开挖不可避免会对土体产生扰动,引起地表沉降,对周围建(构)筑物造成影响。针对盾构隧道施工引起的地层位移, PECK^[1] 提出了地面沉降槽预测 Peck 经验公式。罗雄文等^[2] 采用地表沉降时程曲线和地表横向沉降曲线相结合的方法,分析双线盾构隧道前、后掘进引起的地表沉降规律。许文浪等^[3] 采用数值模拟方法得出盾构施工引起的主要沉降范围及沉降规律。

李大勇等^[4] 和叶飞等^[5] 研究得出土体位移与盾构掘进姿态、盾构机土仓压力、隧道埋深、土层性质、注浆压力等因素有关。ADDENBROOKE 等^[6] 和 DO 等^[7] 通过有限元模拟研究了双线隧道先后开挖对地表沉降的影响,结果显示地表最终沉降曲线非对称分布。魏纲等^[8] 提出土体损失引起的三维地面变形计算公式。张明聚等^[9] 研究得出左、右线分别通过建筑物时基础沉降值迅速增加,有明显的二次沉降规律。刘招伟等^[10] 结合现场监测结果总结了地表沉降规律。刘辉等^[11] 介绍了复合地层中盾构下穿密集建筑群的多种施工技术和应用效果。

对复合地层条件下盾构施工引起的地表沉降是近年来的研究热点,目前地层位移研究多以沉降为主,水平位移研究较少。本文以杭州地铁3号线某区间工程为依托,根据地表沉降监测成果开展有限元模拟,研究复合地层中双线盾构隧道施工时地表沉降和水平位移规律。

1 项目概况

杭州地铁3号线一期工程某区间为双线隧道施工,总长度为1627 m。隧道轴线埋深10.4~18.4 m,盾构前100环双线隧道轴线间距 L 为11 m,采用复合式土压平衡盾构机施工。管片外径 D 为6.2 m,内径 d 为5.5 m,管片厚度0.35 m,环宽1.2 m。先行左线隧道掘进速度平均6环/天,后行右线掘进速度平均2.7环/天。图1为盾构隧道地质剖面图,由图1可知,始发后120 m(100环)区间隧道上部的土层主要分布有碎石填土、素填土,填土层厚度较厚,松散;隧道开挖断面范围内中上部为强风化泥岩,局部有碎石夹黏性土,隧道开挖断面中下部主要土层为中风化泥岩上段,局部有中风化钙质泥岩,强度高、自稳能力强;隧道下方为中风化钙质泥岩。各土层主要物理参数见表1,由表1可知,中风化泥岩以下地层的弹性模量和强度指标普遍大于上部地层,由此该隧道赋存于上软下硬的复合地层。

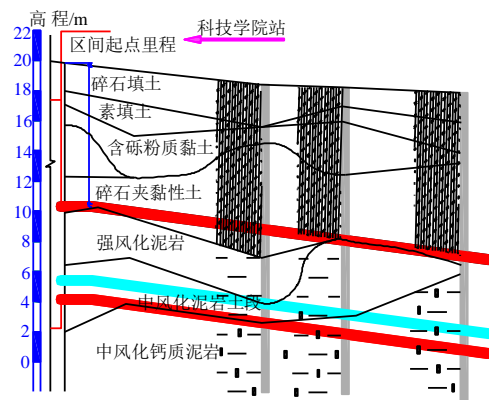


图1 盾构隧道地质剖面图

Fig. 1 Geological section of shield tunnel

表1 土层物理力学参数
Table 1 Physical and mechanics parameters of soil layer

层号	土层	层厚 H/m	自重 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	弹性模量 $E(2 \sim 5E_s)/MPa$	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
①	碎石填土	0.5~5.4	18.7	3.0	10	0.30	3	18
②	素填土	0.4~4.3	18.5	3.5	10	0.30	10	12
③	淤泥质填土	0.9~3.1	17.2	2.0	5	0.30	13	9
④	含砾粉质黏土	0.5~4.1	19.8	6.0	12	0.30	46	15
⑤	碎石夹黏性土	1.3~7.8	20.2	16.0	32	0.30	5	35
⑥	强风化泥岩	0.8~6.7	20.5	11.0	33	0.25	26	33
⑦	中风化泥岩	0.7~14.2	23.5	13.0	48	0.25	150	35
⑧	中风化钙质泥岩	0.5~5.8	25.0	18.0	55	0.25	500	40

2 地表沉降分析

2.1 地表沉降监测

为掌握双线盾构施工中周边道路地表沉降情况,依据相关规范制定监测方案。地表沉降点沿盾构轴线布设,近始发井前 100 环每 5 环设一轴线点,10 环设一监测断面。监测断面点从中线向两侧布设间距,如图 2 所示。

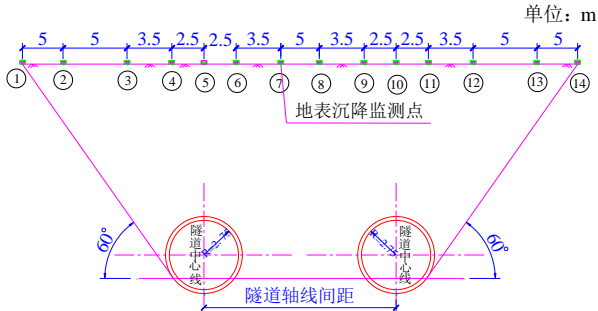


图 2 监测断面地表测点布置示意图

Fig. 2 Layout of monitoring points on the surface of the monitoring section

2.2 地表沉降槽分析

该盾构区间由两台盾构机进行挖掘,左线隧道先行开挖,右线隧道滞后 110 环左右。距始发站为 20 m、30 m、40 m 的观测断面地表沉降分布见图 3 所示。先行隧道通过监测断面时,监测断面只监测 1~10 点,双线隧道都通过监测断面时,监测断面为 1~14 监测点。

由图 3 可知,3 个断面整体位移变化量相接近,40 m 处监测断面隧道所属地层土体泥岩占比相对较大,导致整体变化量小于其他断面,但总体维持在 6~7 mm 之间,由此可知盾构隧道在复合地层中施工地表位移量变化相对稳定,各监测断面监测数据离散性较小,能较好反映地表沉降分布规律。与一般工程监测数据类似,监测数据具有一定的波动性,推测与地层非完全均匀、盾构施工参数波动、地面车辆载荷等干扰因素相关。

先行隧道单线施工时,地表沉降大致符合 Peck 曲线分布,沉降槽曲线呈现“V”型,沉降最大值出现在隧道轴线附近处,当双线隧道都通过监测断面时,最终的地表沉降呈现“W”型分布,沉降曲线出现两个极值点,极值点出现在各自隧道轴线附近,沉降分布与 Peck 曲线差距较大。说明后行线开挖对地层造成二次扰动,产生新的位移,与先行隧道掘进形成的位移叠加,两次位移存在叠加效应,这与相关文献的研究成果一致^[12]。该区段断面最大沉降量在 6~8 mm 之间,不同断面存在一定差

异,与地层构成有关。

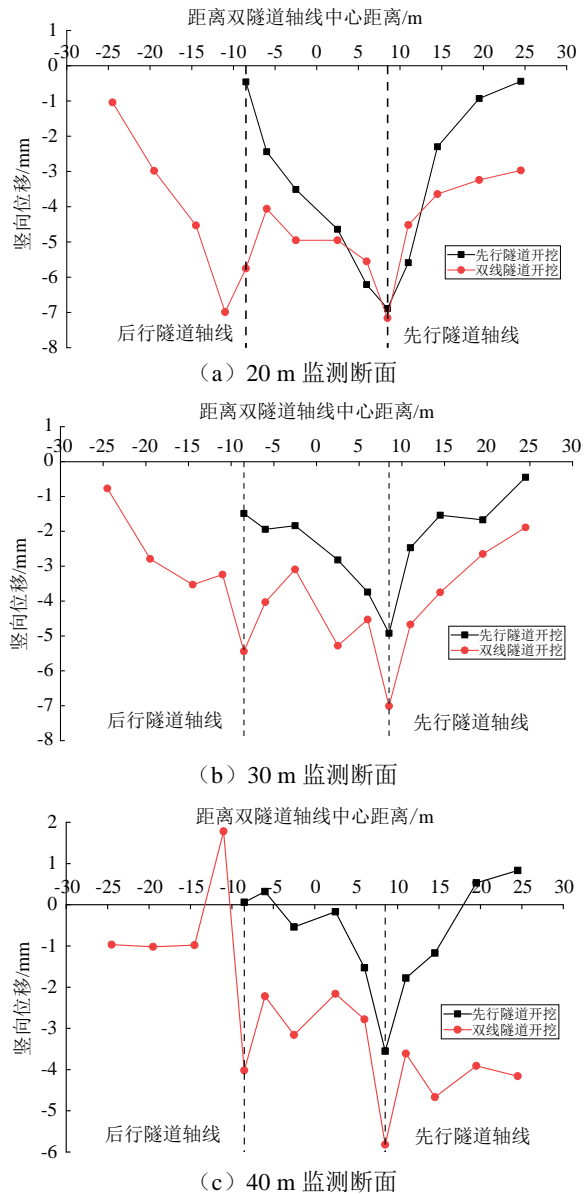


图 3 地表沉降分布曲线

Fig. 3 Distribution of surface settlement

3 地层位移的数值模拟分析

采用 MIDAS/GTSNX 有限元分析软件对复合地层前 50 环盾构开挖过程进行模拟分析,水位设为 -2 m,模型长 60 m、宽 100 m、深 50 m,见图 4,土体计算参数见表 1。

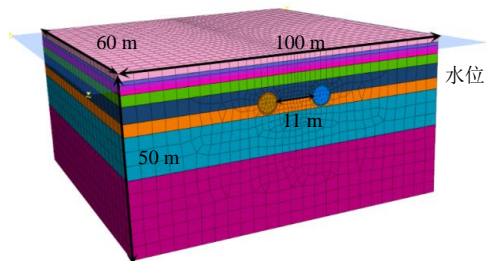


图 4 三维计算模型

Fig. 4 Three-dimensional numerical model

对盾构施工动态全过程模拟, 施工阶段模拟: 土体开挖、管片纵向拼接、同步注浆; 荷载模拟: 千斤顶对管片推力、掘进压力、注浆压力。具体模拟步骤见表 2。

表 2 隧道开挖分析步骤

Table 2 Analytical steps of tunnel excavation		
分析步骤	激活	钝化
初始地应力场分析, 位移清零	土层和隧道的开挖层和注浆层	—
掘进第 1 环土体	第 1 环的盾壳和掌子面掘进压力	第 1 环的土体和注浆层
掘进第 2 环土体	第 2 环的盾壳、管片、浆液、掌子面掘进压力和注浆压力	第 2 环的土体和注浆层, 第 1 环的盾壳
掘进第 3 环土体	第 3 环的盾壳、管片、浆液、掌子面掘进压力和注浆压力、千斤顶对管片 1 推力	第 3 环的土体和注浆层、第 2 环的盾壳
掘进第 4 环土体	第 4 环的盾壳、管片、浆液、掌子面掘进压力和注浆压力、千斤顶对管片 2 推力	第 4 环的土体和注浆层、第 3 环的盾壳、管片 2 的千斤顶力
以此类推, 依次掘进		

软件中管片采用 2D 板单元模拟。由于管片环存在接头, 对其刚度会有影响, 目前管片常用设计方法中并不考虑此影响, 在修正设计方法中适当考虑折减, 但折减率目前未有统一理论。在此为了将问题简化, 模型中借鉴常用设计方法, 不考虑接缝对刚度的影响。考虑管片主要承受土体环向压力, 因此将管片的纵向弹性模量等同于横向弹性模量。

盾构工程中壁后注浆材料经历了一个复杂的动态连续硬化过程, 弹性模量、强度等力学参数随时间发生连续变化。为了充填密实, 工程中采用带压注浆, 注浆量是壁后空间体积的 2 倍左右。因此为了使模型简化, 认为充填是密实的, 壁后注浆材料采用线弹性模型。

依据地铁设计规范^[13] 以及该工程施工参数选取掘进压力为 0.12 MPa, 注浆压力为 0.2 MPa, 千斤顶对管片压力为 0.1 MPa, 结构计算参数见表 3。

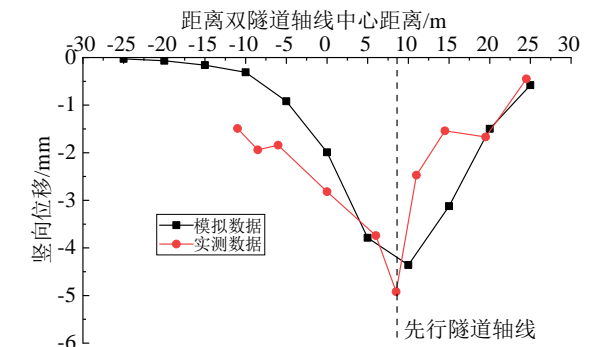
3.1 竖向位移分析

将距始发站 20 m 的监测断面实测数据与数值模型 17 环处模拟数据进行对比, 如图 5。双线隧道先后开挖通过监测断面时, 数值模拟与实测数据变化规律基本一致, 数值模拟的地表沉降最大值相对

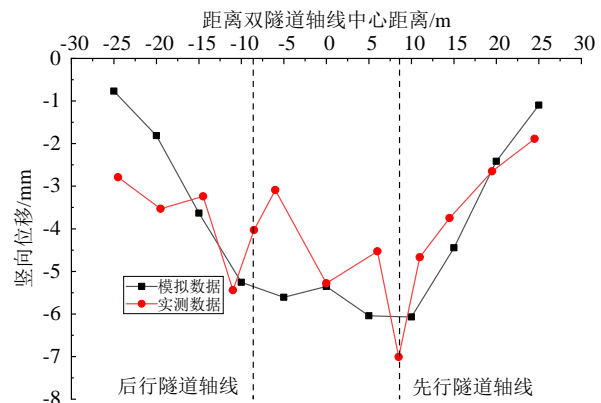
较小, 曲线较平顺。由此可知, 数值模拟结果与实测数据相互论证, 符合实际规律, 反映了建立的模型具有合理性, 模拟计算结果具有一定的准确性, 对后续盾构施工土层扰动影响具有一定参考价值。

表 3 结构材料计算参数

Table 3 Parameters of structure materials			
名称	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
管片	30.00	0.2	25
盾构外壳	250.00	0.2	78
注浆	0.01	0.2	20



(a) 先行隧道施工



(b) 后行隧道施工

图 5 双线隧道先后施工时实测与模拟对比图

Fig. 5 Comparison of measured and simulated results during successive construction of double-line tunnels

3.2 复合地层竖向位移规律分析

比较上软下硬土层的交界面 (以下简称交界面) 在不同位置时地表竖向位移的差异。交界面位置设定为 4 种情况, 分别位于土层③顶面 (情况一)、土层⑤顶面 (情况二)、土层⑥顶面 (隧道截面圆心) (情况三)、土层⑦顶部 (情况四), 硬土层性质取为土层⑦, 见图 6。此外设定同一种性质软土层 (情况五) 和硬土层 (情况六)。6 种情况下地层分布见表 4, 对应的力学性质见表 1。6 种情况下模型计算步骤见表 2。6 种情况的地表竖向位移

分布见图 7 所示。

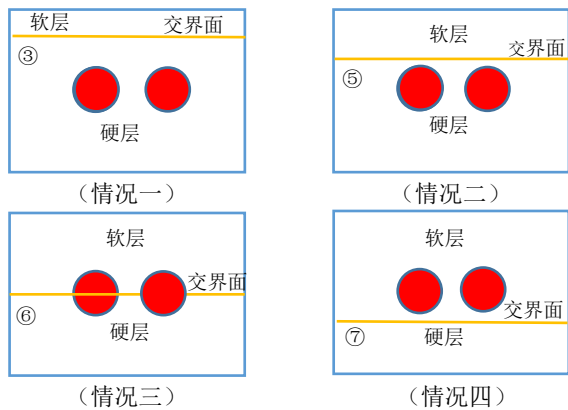


图 6 隧道与复合地层界面相对位置关系图

Fig. 6 Relative position of the interface between tunnel and composite formation

表 4 不同模型地层分布

Table 4 Stratigraphic distribution of different models

情况一	情况二	情况三	情况四	情况五	情况六
①	①	①	①		
②	②	②	②		
⑦硬层	③	③	③		
—	④	④	④	④软层	⑦硬层
—	⑦硬层	④	④		
—	—	⑦硬层	④		
—	—	—	⑦硬层		

注：表 4 中的数字为地层编号。

由图 7 可见，按地表沉降量大小可将 6 种情况分成 3 组。当地层都是硬土层（情况六）和隧道截面处于硬土层且地表软土层较薄时（情况一）为第 1 组，两者位移量较小；当地层都是软土层（情况五）和隧道截面完全处于软土层时（情况四）为第 2 组，地表位移量较大；当软硬土层界面贴近隧道上表面（情况二）和位于隧道截面中部时（情况

三）为第 3 组，两者地表位移量接近，介于以上 2 组之间。3 组位移量的对比关系符合一般规律，即隧道开挖在硬土层中地表位移小于软土层位移。对比情况一和情况二地表位移可见，当软硬土层界面位于隧道上方时，随着交界面的下移，最大沉降位移显著增大，其原因是地表沉降主要由上部地层的位移构成，上部地层的性质对地表位移影响显著。复合地层发生明显沉降的地表范围与软土层接近，与硬土层差距明显。复合地层沉降范围大致为 70 m（11 D），硬土层大致为 50 m（8 D）。

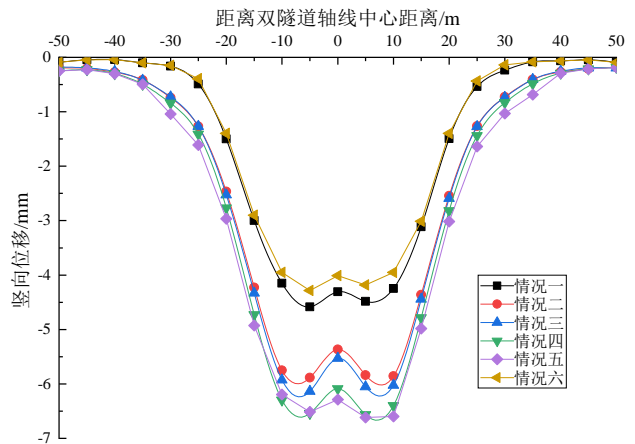


图 7 地表沉降曲线分布图

Fig. 7 Distribution map of surface settlement curves

3.3 水平位移分析

图 8 为双线隧道先后施工完成后水平位移云图，距始发站 20 m 监测断面（地表以下 3 m）水平位移沿横向分布见图 9，水平位移值的正负表示沿相反方向变形（向右侧移动为正）。由图 8 可见，水平位移呈现对称分布，即先行隧道施工后，沿先行隧道轴线对称分布；后行隧道施工后，沿两隧道轴线中心处对称分布。水平位移最大绝对值为 2.99 mm，是最大竖向位移量的 41.2%。

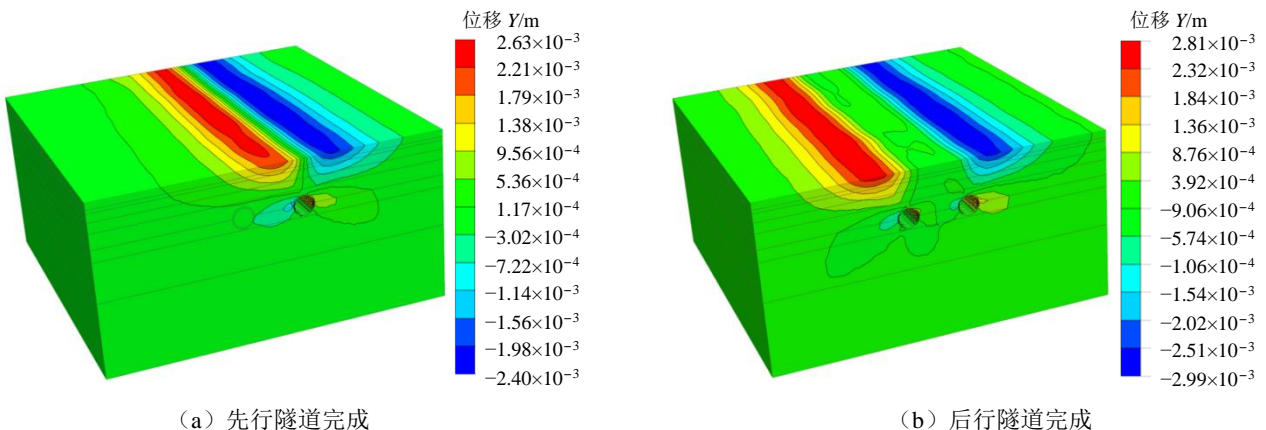


图 8 水平位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement nephogram

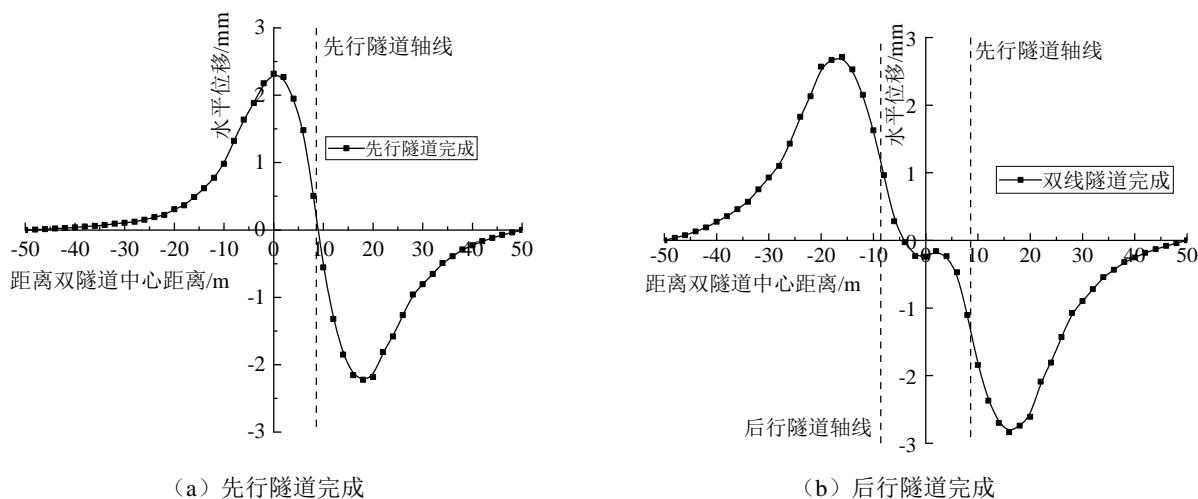


图9 水平位移分布

Fig. 9 Horizontal displacement distribution

由图9可知,先行线开挖后地表水平位移有2个峰值,位置在距离隧道轴线 $1.5D$ 处,在隧道中心处位移几乎为0,随着远离隧道轴线,水平位移由小变大,当水平位移达到最大值后随着离隧道轴线距离增加而先加速后缓慢减小。在距离隧道轴线约 $2.7D$ 处水平位移出现反弯点,在距离隧道轴线 $3.4D$ 处水平位移只有最大值的25%左右。随着后行线隧道的开挖,导致地表水平位移增大,峰值位移增大24%;后开挖隧道侧的峰值位移向后开挖侧移动 $2.6D$,先开挖隧道侧的峰值位移向后开挖侧略微移动,在双隧道中心处地层水平位移接近于0。

4 结论

以杭州地铁3号线一期工程某区间隧道为依托,对盾构前100环施工的监测数据进行了分析,并结合有限元数值模拟,研究盾构隧道施工引起地层的位移分布及变化规律,得出以下结论:

(1)先行隧道施工时,地表沉降大致符合Peck曲线分布,最大值位于隧道轴线附近处,当双线隧道施工时,地表沉降呈现“W”型分布,两个极值点位于各自隧道轴线处。

(2)基于数值模拟分析可见,地表竖向位移与实测数据大致相符;在水平位移上,单线隧道施工时,距离隧道轴线 $1.5D$ 处的水平位移达最大,在距 $2.7D$ 处,出现反弯点。

(3)复合地层情况下地表沉降介于全部为硬层和软层之间。当交界面位于隧道上方时,随着交界面的下移,最大沉降位移显著增大。地表沉降主要由上部地层的位移构成,上部地层的性质对地表位移影响显著。

(4)随着后行隧道的开挖,导致地表水平位移增大,峰值位移增大24%;后开挖隧道侧的峰值位移向后开挖侧移动 $2.6D$,先开挖隧道侧的峰值位移向后开挖侧略微移动。

本文主要结论对工程设计和施工具有借鉴意义。双线盾构隧道开挖时复合地层地表沉降范围与软土地层时接近,在评估盾构施工环境效应时可以参考。软硬地层交界面位置对地表沉降有直接影响,在盾构隧道设计与施工时要注意识别。

参考文献

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in softground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: State of the Art Volume, 1969: 25-290.
- [2] 罗雄文, 张文广, 梁荣柱. 双孔隧道中后掘进盾构对地表沉降的影响[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 82-89.
LUO Xiong-wen, ZHANG Wen-guang, LIANG Rong-zhu. Influence of subsequent shield tunneling on ground surface settlement during construction of twin tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Technology, 2020, 37(9): 82-89.
- [3] 许文浪, 夏志凡, 张艳全. 盾构隧道下穿既有通道诱发沉降数值分析及现场监测[J]. 南昌工程学院学报, 2020, 39(4): 43-48.
XU Wen-lang, XIA Zhi-fan, ZHANG Yan-quan. Numerical analysis and field monitoring of settlement induced by shield tunneling under existing tunnel[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2020, 39(4):

- 43-48.
- [4] 李大勇, 陈福全, 王晖. 盾构掘进中深层土体变形实测分析与研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊1): 4540-4543.
- LI Da-yong, CHEN Fu-quan, WANG Hui. Monitoring and analysis on deformation of deep soils during shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4540-4543.
- [5] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 618-624.
- YE Fei, GOU Chang-fei, CHEN Zhi, et al. Monitoring and analysis on deformation of deep soils during shield tunneling[J]. Geotechnical Engineering Journal, 2014, 36(4): 618-624.
- [6] ADDENBROOKE T I, POTTS D M. Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2001, 1(2): 249-271.
- [7] DO N A, DIAS D, ORESTE P. Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics and Engineering, 2014, 15(11): 896-913.
- [8] 魏纲, 张世民, 齐静静, 等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 3317-3323.
- WEI Gang, ZHANG Shi-min, QI Jing-jing, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3317-3323.
- [9] 张明聚, 刘晓娟, 杜永骁. 复合地层中盾构施工对邻近建筑物群的影响分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(2): 214-219.
- ZHANG Ming-ju, LIU Xiao-juan, DU Yong-xiao. Influence analysis of shield construction on adjacent buildings in composite stratum[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(2): 214-219.
- [10] 刘招伟, 王梦恕, 董新平. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1297-1301.
- LIU Zhao-wei, WANG Meng-shu, DONG Xin-ping. Analysis of ground settlement caused by shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1297-1301.
- [11] 刘辉, 李彦青. 上软下硬浅覆土条件下土压平衡盾构下穿密集建筑群施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 186-192.
- LIU Hui, LI Yan-qing. Construction technology of earth pressure balance shield tunneling through dense buildings under soft upper and hard and shallow overburden[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(6): 186-192.
- [12] 范雨, 苏艺, 袁勇, 等. 复合地层双线地铁隧道施工地表沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 762-768, 789.
- FAN Yu, SU Yi, YUAN Yong, et al. Study on the law of surface settlement during construction of double track subway tunnel in composite stratum[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 762-768, 789.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Construction, PRC. Code for Subway Design: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.