

文章编号: 1674-599X(2022)02-0054-08

盾构隧道重叠下穿地铁隧道施工变形规律研究

蔡光伟¹, 蒋超¹, 刘振兴¹, 胡江锋²

(1.长沙市轨道交通集团有限公司, 湖南 长沙 410000; 2.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 为研究近接重叠下穿既有隧道的盾构施工对地表和既有隧道的影响, 以长沙地铁3号线下穿地铁1号线的盾构隧道工程为依托, 采用Midas/GTS NX软件建立三维模型, 考虑土仓压力、注浆压力、注浆量和掘进速度影响下, 探究新建隧道施工对地表沉降和既有隧道位移的影响。研究表明: 土仓压力增大会减少地表沉降量, 且掌子面前、后各3.5倍隧道洞径区间内完成了90%的竖向变形; 增大注浆压力和注浆量均可减少既有隧道的竖向位移, 但注浆量对既有隧道竖向变形的控制作用较注浆压力的大, 当研究区间的注浆压力和注浆量分别提高了1.5倍、0.6倍时, 既有隧道竖向变形分别降低了0.5、0.9 mm; 盾构掘进速度增大, 地层所受扰动增大, 地表最大沉降量和既有隧道最大竖向位移也增大。研究成果可为类似工程施工提供技术指导。

关键词: 既有隧道; 注浆压力; 掘进速度; 数值模拟

中图分类号: U452

文献标志码: A

Study on construction deformation law of shield tunnel overlapping through the subway tunnel

CAI Guangwei¹, JIANG Chao¹, LIU Zhenxing¹, HU Jiangfeng²

(1.Changsha Metro Group Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to study the influence of shield construction on the surface and existing tunnel, based on the shield tunnel project of Changsha Metro Line 3 underpass Metro Line 1, the three-dimensional model was established using the Midas/GTS NX software. Considering the soil bin pressure, grouting pressure, grouting amount and excavation speed, the influence of new tunnel construction on surface settlement and existing tunnel displacement was explored. The results show that the increase of soil bin pressure will reduce the surface settlement, and 90% of the vertical deformation is completed in the interval of 3.5 times the tunnel diameter in front and behind of the tunnel working face. Increasing the grouting pressure and grouting amount can reduce the vertical displacement of the existing tunnel, however the control effect of grouting amount on the vertical deformation of the existing tunnel is greater than that of grouting pressure. The grouting pressure and grouting amount in the study section are increased by 1.5 and 0.6 times respectively, the vertical deformation of the existing tunnel is reduced by 0.5 and 0.9 mm respectively. With the increase of shield excavation speed, the greater the disturbance to the stratum, the greater the maximum surface settlement and the maximum vertical displacement of the existing tunnel. The research results can provide technical guidance for the similar engineering construction.

Key words: existing tunnel; grouting pressure; excavation speed; numerical simulation

收稿日期: 2021-03-31

基金项目: 2021年长沙市住房和城乡建设局项目“盾构隧道长距离交叠, 并行近接下穿运营地铁隧道施工安全控制技术研究”

作者简介: 蔡光伟(1975—), 男, 长沙市轨道交通集团有限公司高级工程师。

随着城市轨道交通路径的完善,接近运营隧道的新建隧道施工工程日益增多。对于近接穿越既有隧道的盾构隧道施工,新建盾构隧道的施工会对地层中的土体产生扰动,引起地层应力的重新分布,导致地表土体的沉降,并对既有隧道的结构造成损伤,给隧道的安全运营带来隐患。因此,研究盾构隧道下穿既有隧道施工变形规律,对隧道安全运营有重要意义。很多学者已对类似工程进行了研究。张健等人^[1]通过现场实测和数值模拟,得出盾构隧道近距离下穿既有隧道施工时的土层变形规律。魏纲等人^[2]采用剪切错台模型,建立了计算方程,求解了新建隧道正交下穿时既有隧道的竖向位移。王明年等人^[3]建立了新的三维模拟方法,对盾构隧道重叠段进行了横向近接分区。孙志岗^[4]利用有限元方法对接近隧道施工时产生的力学效应进行了研究,并提出了相应的施工优化方案。王思洋^[5]通过FLAC3D研究了盾构隧道下穿并行近接已有隧道施工中盾构参数的影响,并总结出适用于对应工程最可靠的施工参数。杨成永等人^[6]结合现场监测与数值模拟,阐明了双线盾构交叉下穿既有运营隧道的沉降规律。张海波等人^[7]模拟并行隧道的不同空间位置,认为其相对位置的接近会增大既有隧道衬砌的位移和应力。AVGERINOS等人^[8]分析了盾构垂直下穿运营隧道空间位置的变化对既有隧道纵横向衬砌的影响。肖果^[9]运用有限差分软件模拟了盾构施工,得到新建隧道的盾构推力与既有隧道间距、上覆土层厚度对既有隧道扰动的影响规律。张孟喜等人^[10]研究了四线叠交的盾构穿越,对既有隧道的变形规律进行了分析。廖少明等人^[11-14]等人对重叠近接隧道施工进行了研究,分析了施工顺序条件对既有隧道和地表沉降的影响规律。奚灵智等人^[15]利用FLAC3D有限元软件,对比分析了既有隧道软土地基的不同加固方式,提出了最适合软土地区重叠下穿既有隧道施工的地基加固方案。但针对重叠下穿既有隧道的施工参数对地表和既有隧道变形的影响规律研究少见。因此,本研究拟以长沙地铁3号线近接重叠下穿既有1号线的盾构隧道施工为依托,采用Midas/GTS NX模拟软件对盾构施工进行模拟,分析不同施工参数对既有隧道和地表变形的影响,获得最适宜的掘进参数,为类似工程施工提供借鉴。

1 工程概况

长沙地铁3号线灵官渡站—侯家塘站区间,该区间隧道在DK18+087~DK18+348(261 m)和DK18+516~DK18+705(189 m)段与既有隧道1号线的相对空间位置关系为下穿重叠,重叠段总长度为450 m。区间隧道在侯家塘站西端头处的最小垂直净距为5.5 m。

在该重叠段范围内,新建3号线隧道位于强风化泥质粉砂岩和中风粉砂质泥岩中,运营地铁1号线隧道处于强风化泥质粉砂岩和冲击中砂内。强风化泥质粉砂岩呈褐红色、暗紫红色,岩石组织结构大部分被破坏,但尚可清晰辨认,矿物成分已显著变化,局部夹有中风化岩块,岩质极软,遇水易软化成为软化岩石,岩体基本质量等级为V级。中风化粉砂质泥岩呈褐红色、褐黄色等,砾状结构,岩体较破碎,岩芯呈短柱状、块状、饼状,局部夹强风化岩块,节长5~25 cm, RQD为10~96,软化系数0.12~0.63,均小于0.75,为软化岩石,岩体基本质量等级为V级。

模拟区间盾构隧道地层条件、尺寸及隧道位置关系如图1所示。

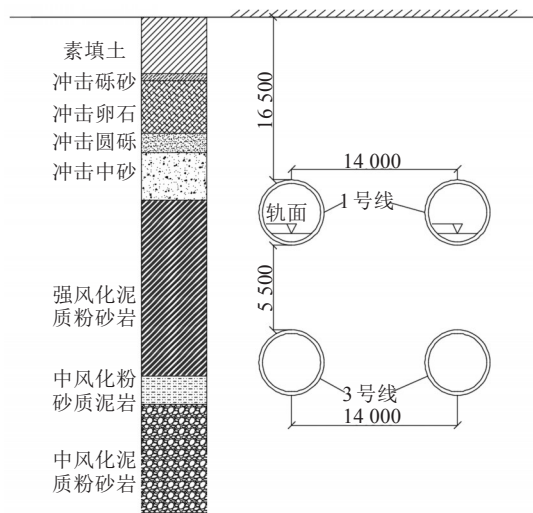


图1 地层条件剖面(单位:mm)

Fig. 1 Formation condition section (unit:mm)

2 数值模拟计算

结合现场隧道穿越土层的实际情况,利用Midas/GTS NX对盾构施工进行模拟。为增加模型

的准确性，尽可能减小模型的体积，提高计算机的计算速率，取模型边界到隧道中心轴线距离的3~5倍距离开挖洞径，X，Y，Z方向分别取66、75、64 m。根据勘测的土体物理力学参数进行取值，考虑土体符合摩尔-库伦准则，本模型中土层物理力学参数见表1，模拟材料物理力学参数见表2。模型中，根据长沙类似盾构工程和现场反馈数据，设置模拟工况参数，见表3，建立数值模型如图2~4所示。

为直观突出盾构隧道施工过程中对地表和既有隧道结构的不利影响，将模拟新建3号线隧道左线完成固结沉降的施工过程，与新建3号线隧道右线施工的模拟结果进行对比。

表1 模型地层参数
Table 1 Model stratigraphic parameter

名称	层厚/ m	重度/ kN·m ⁻³	变形 模量/ MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ (°)
素填土	4.3	18.6	2.8	0.31	10	11.0
冲击砾砂	1.2	18.5	29.6	0.22	0	32.0
冲击卵石	6.0	18.9	139.4	0.20	0	45.0
冲击圆砾	2.0	18.7	46.7	0.20	0	35.0
冲击中砂	4.0	16.7	16.9	0.24	0	29.0
强风化泥质粉砂岩	12.5	22.9	130.0	0.26	50	28.0
中风化粉砂质泥岩	3.5	23.8	330.0	0.26	32	17.5
中风化泥质粉砂岩	29.5	24.1	700.0	0.26	280	38.0

表2 模拟材料物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameter of simulated material

材料	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/mm
盾壳	78.0	212 000	0.25	150
注浆层	24.3	700	0.25	150

表3 模拟工况参数
Table 3 Simulated operating parameter

参数 类型	土仓压力/ kPa	注浆压力/ kPa	注浆量/ m ³	掘进速度/ (mm·min ⁻¹)
Level-1	120	200	5	10
Level-2	240	300	6	20
Level-3	360	400	7	30
Level-4	480	500	8	40

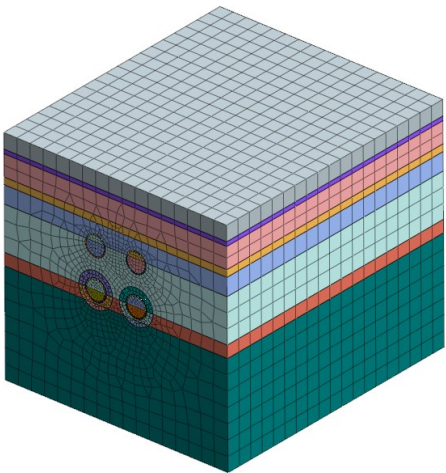


图2 有限元模型
Fig. 2 The finite element model

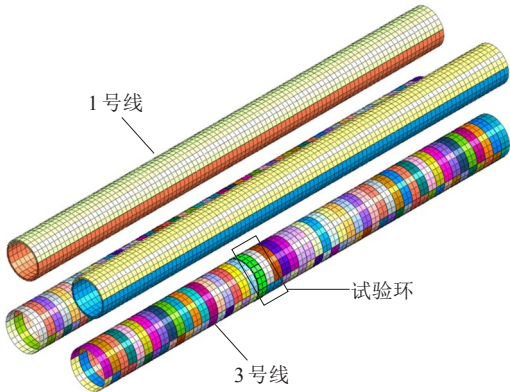


图3 3号线与1号线空间位置关系
Fig. 3 Spatial position relationship of the Metro Line 3 and the Metro Line 1

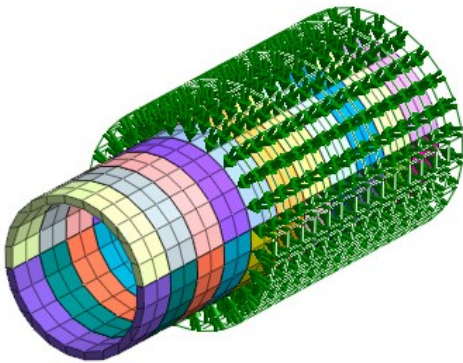


图4 注浆压力示意
Fig. 4 The grouting pressure schematic

2.1 盾构掘进土仓压力

在盾构隧道施工过程中，土仓压力作为盾构掘进的主要参数之一，其大小影响掌子面的支护和地层变形。选取土仓压力分别为120、240、360和480 kPa 4种施工工况进行施工模拟。

当盾构施工右线开挖完成时, 研究盾构推进对模型中心处地表沉降位移的影响, 如图5所示。当盾构右线开挖至试验环时, 研究了其距离对地表竖向位移的影响, 如图6所示。

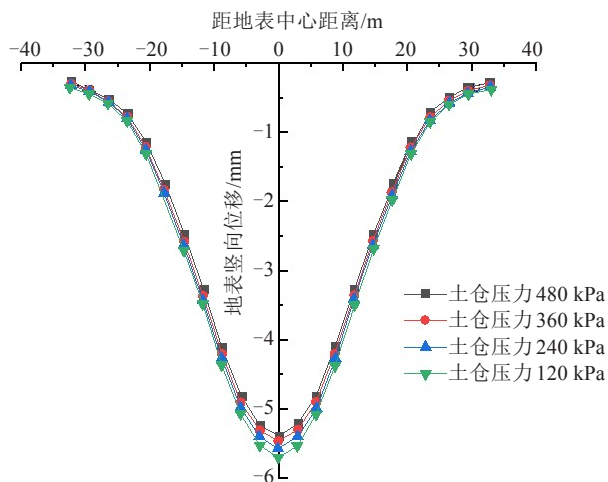


图5 模型中心处地表沉降位移横截面对比

Fig. 5 Comparison of cross-section of surface subsidence displacement at the center of the model

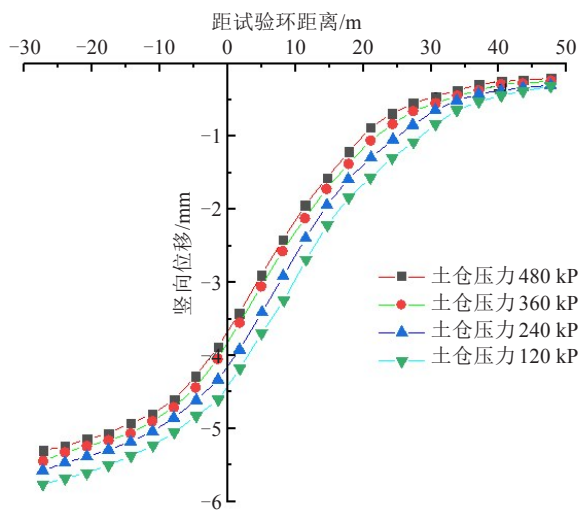


图6 隧道开挖至试验环地表土体竖向位移对比

Fig. 6 Comparison of vertical displacement of surface while tunnel excavate to test ring

从图5中可以看出, 土仓压力分别为150、200、250和300 kPa时, 地表沉降曲线均符合Peck公式沉降槽的形式, 随着土仓压力的增大, 对土体的变形有一定控制效果, 地表最大沉降减小。从图6中可以看出, 随着土仓压力的增大, 掌子面前、后方的地表竖向位移均减少, 在掌子面前、后各3.5倍隧道洞径区域内为地表竖向变形变化的

最大区间, 大约完成了90%的竖向变形。因此, 加强掌子面前、后各3.5倍隧道洞径内土体控制, 可以减小地表沉降。

考虑既有隧道右线所处位置最为不利, 研究了盾构推进对既有隧道右线轴线方向竖向位移的影响, 如图7所示。

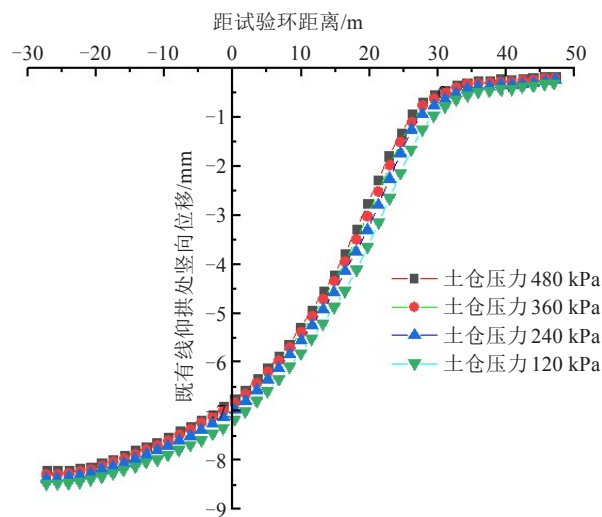


图7 既有隧道右线仰拱竖向位移对比

Fig. 7 Comparison of the vertical displacement at inverted arch of the right line of the existing tunnel

从图7可以看出, 随着土仓压力的增大, 掌子面前、后方的既有隧道左线沉降减小。表明: 注浆压力的增大, 可减少新建隧道盾构开挖对既有隧道的沉降变形, 但效果有限。土仓压力在120~480 kPa时, 既有隧道右线仰拱最大竖向位减少了约0.4 mm。

结合土仓压力在不同工况下地表与既有隧道的沉降变形规律, 该区间土仓压力设置在120~240 kPa。

2.2 盾构掘进注浆压力

盾构施工过程中, 盾尾与管片之间存在间隙, 为避免土体产生过大的沉降量, 需及时对盾尾空隙进行注浆, 选取注浆压力分别为200、300、400、500 kPa 4种施工工况对该区间进行建模分析。模拟中心地表沉降位移横截面对比如图8所示。盾构右线开挖至试验环时, 研究了其距离对地表竖向位移的影响, 如图9所示, 其对既有隧道轴线方向竖向位移的影响如图10所示。

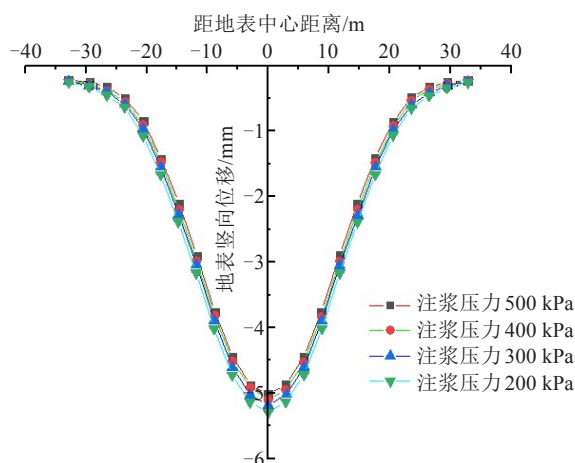


图8 模型中心处地表沉降位移横截面对比

Fig. 8 Comparison of cross-section of surface subsidence displacement at the center of the model

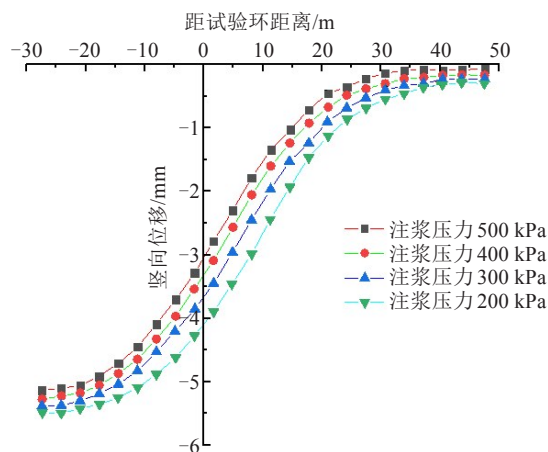


图9 隧道开挖至试验环地表竖向位移对比

Fig. 9 Comparison of vertical displacement of surface while tunnel excavate to test ring

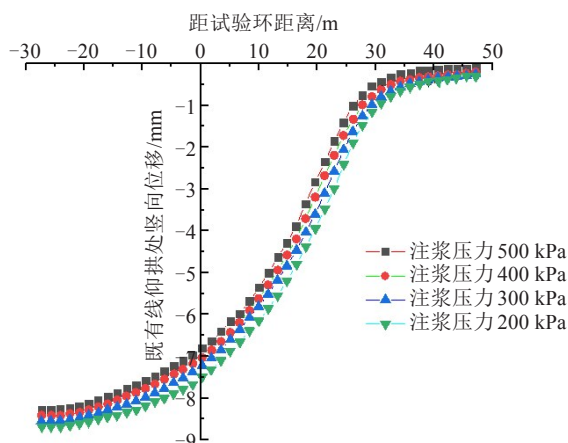


图10 既有隧道右线仰拱竖向位移对比

Fig. 10 Comparison of the vertical displacement at the inverted arch of the right line of existing tunnel

从图8~10中可以看出, 注浆压力分别为200、300、400、500 kPa时, 最大地表竖向变形值依次

降低, 但变化幅度减小, 对减少地表竖向位移作用有限; 注浆压力在200~500 kPa, 最大既有隧道右线仰拱竖向变形值约降低0.5 mm。表明: 注浆压力对既有隧道竖向变形的控制作用较土仓压力的大。结合现场的地层条件和施工经验, 将该区间内的注浆压力控制在300~400 kPa较为合适。

2.3 盾构掘进注浆量

权衡同步注浆的效果, 除考虑注浆压力, 还需考虑注浆材料、浆液配比和注浆量等因素的影响。盾构施工过程中, 注浆材料及其配比已选定, 除注浆压力外, 注浆量也常发生动态变化。选取注浆量分别为5、6、7、8 m³ 4种施工工况, 对该区间进行建模分析。模拟中心地表沉降位移横截面对比如图11所示。盾构右线开挖至试验环时, 研究了距离对地表竖向位移的影响如图12所示, 以及距离对既有隧道轴线方向竖向位移的影响如图13所示。

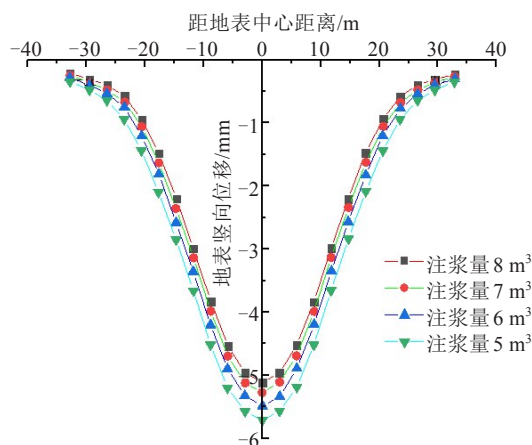


图11 模型中心处地表沉降位移横截面对比

Fig. 11 Comparison of cross-section of surface subsidence displacement at the center of the model

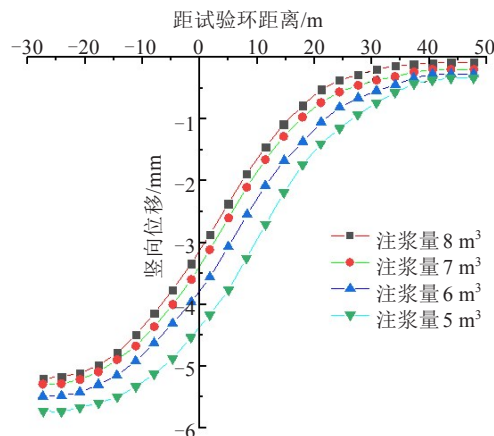


图12 隧道开挖至试验环地表竖向位移对比

Fig. 12 Comparison of vertical displacement of surface while tunnel excavate to test ring

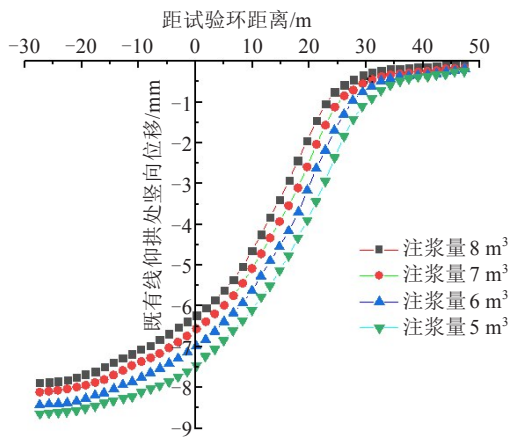


图13 既有隧道右线仰拱竖向位移对比

Fig. 13 Comparison of the vertical displacement at inverted arch of the right line of the existing tunnel

从图11~13中可以看出, 注浆量分别为5、6、7、8 m³时, 最大地表竖向变形值依次降低, 但变化幅度减小; 注浆量在5~8 m³时, 最大既有隧道右线仰拱竖向变形值约降低0.9 mm。表明: 注浆量对其竖向变形的控制作用较注浆压力的大, 其原因是随着注浆量地增大, 浆液向周围土体中扩散、挤密, 导致既有隧道与新建开挖隧道之间的土体被加固, 进而降低既有隧道仰拱的沉降变形。结合现场的地层条件, 将该区间注浆量设置为6.5~7.5 m³。

2.4 盾构掘进速度

选取盾构掘进速度分别为10、20、30、40 mm/min 4种施工工况, 对此区间进行建模分析。模型中心地表沉降位移横截面对比如图14所示。地表竖向位移对比如图15所示。既有隧道轴线方向处竖向位移对比如图16所示。

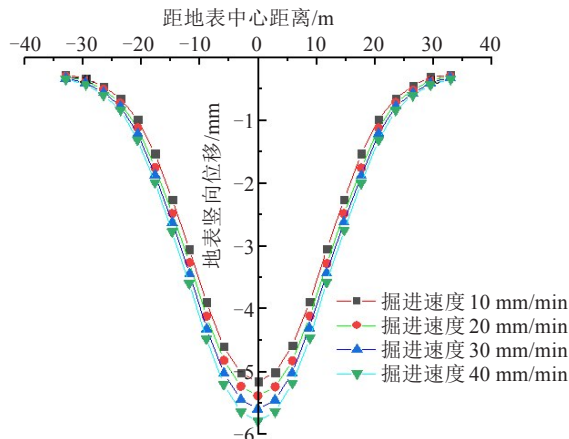


图14 模型中心处地表沉降位移横截面对比

Fig. 14 Comparison of cross-section of surface subsidence displacement at the center of the model

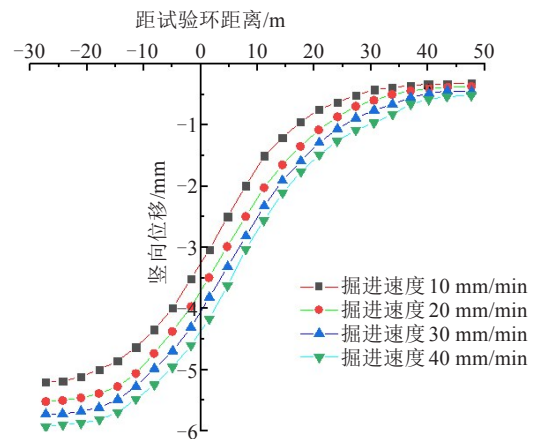


图15 隧道开挖至试验环地表竖向位移对比

Fig. 15 Comparison of vertical displacement of surface while tunnel excavate to test ring

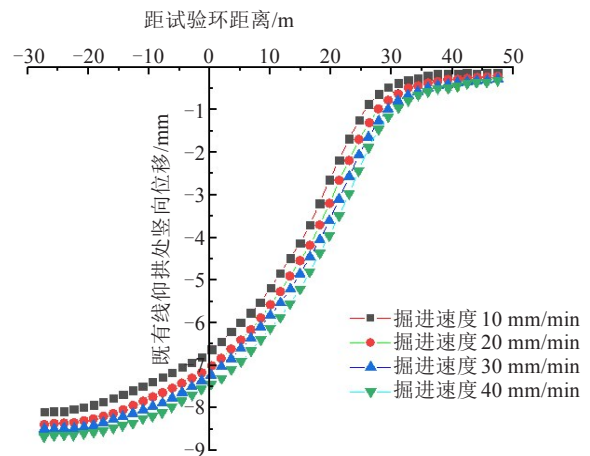


图16 既有隧道右线仰拱竖向位移对比

Fig. 16 Comparison of the vertical displacement at inverted arch of the right line of the existing tunnel

从图14~16中可以看出, 随着掘进速度的增大, 最大地表竖向变形值依次增大, 地表竖向位移的变化幅度减小, 掘进速度从10 mm/min增大到40 mm/min, 最大地表沉降约增大0.8 mm。表明: 当掘进速度提高时, 土体内应力集中释放, 导致土体产生较大的变形。因此, 根据本模型的计算结果和类似盾构施工工程的资料分析, 将该区间的掘进速度设定为20~30 mm/min为宜。

3 与监测结果进行对比分析

3.1 现场监测点布置

根据长沙轨道交通3号线与1号线的平面位置关系, 沿着重叠区域设置地表沉降观测点, 每隔10 m设置一个断面, 每个断面设置15个测点, 测

点间距 2 m, 其测点布置平面图如图 17 所示。图 17 中 ▲ 表示测点。

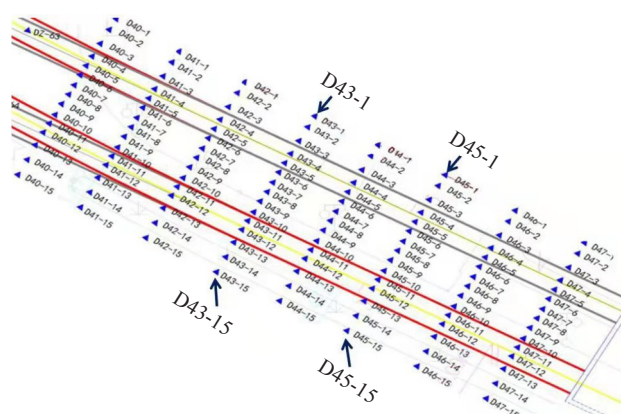


图 17 监测点平面布置

Fig. 17 Layout plan of the monitoring points

3.2 现场监测数据对比分析

盾构掘进过程中, 施工参数随现场实际土层情况而变化, 取左、右线中心处附近地表部分现场监测结果, 如图 18 所示。

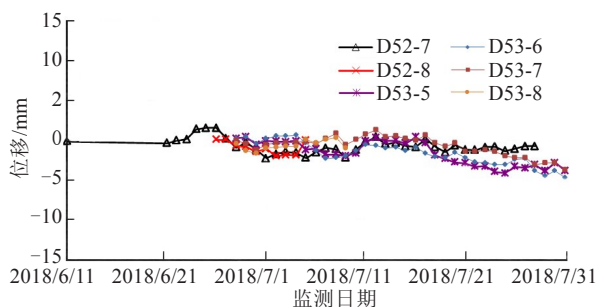


图 18 地表沉降监测点成果曲线

Fig. 18 Results curve of the surface settlement monitoring points

从图 18 可以看出, D52-7 在前期有隆起现象, 这是由于现场土层的不均匀性和注浆压力调整过高, 地表土体总体沉降变形呈先增大, 后稳定趋势, 最大沉降值为 5 mm, 与数值分析结果吻合, 证明数值分析可靠。

4 结论

结合长沙地铁 3 号线灵侯区间情况, 对近接重叠下穿既有运营地铁 1 号线进行施工。采用 Midas/GTS NX 有限元软件对掘进施工进行模拟分析, 得到结论为:

1) 随着土仓压力的增大, 掌子面前、后方的地表竖向位移减少, 且掌子面前、后各 3.5 倍隧道

洞径范围为地表竖向变形的最大区间, 且完成了 90% 的竖向变形。因此, 加强掌子面前、后各 3.5 倍隧道洞径内土体的控制, 对减小地表沉降有重要意义。

2) 注浆压力的增大可减少地表竖向位移, 但效果有限。注浆量对既有隧道的竖向变形控制作用较注浆压力的大, 其原因是随着注浆量的提高, 浆液向周围土体中扩散、挤密, 导致既有隧道与新建开挖隧道之间的土体加固范围扩大, 降低了既有隧道仰拱的沉降变形。

3) 盾构隧道施工过程中掘进速度越大, 地表最大沉降量和既有隧道最大竖向位移也越大。

4) 结合该工程下穿施工特点, 最佳的盾构施工参数取值为: 土仓压力取 120~240 kPa, 注浆压力取 300~400 kPa, 注浆量取 6.5~7.5 m³, 掘进速度取 20~30 mm/min。可为类似近接重叠下穿既有隧道的盾构施工提供指导。

参考文献(References):

- [1] 张健,周中,邢凯. 盾构隧道近接施工对地层变形的影响[J]. 交通科学与工程,2019,35(4):63-70. (ZHANG Jian, ZHOU Zhong, XING Kai. The influence of shield tunnel construction adjacent to the existing structure on deep soil displacement[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019,35(4):63-70.(in Chinese))
- [2] 魏纲,俞国骅,杨波. 新建盾构隧道下穿既有隧道剪切错台变形计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(9):103-112. (WEI Gang, YU Guohua, YANG Bo. Calculation of existing shield tunnel shearing dislocation platform deformation due to undercrossing new shield tunnel undercrossing[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018,45(9):103-112.(in Chinese))
- [3] 王明年,张晓军,苟明中,等. 盾构隧道掘进全过程三维模拟方法及重叠段近接分区研究[J]. 岩土力学,2012,33(1):273-279. (WANG Mingnian, ZHANG Xiaojun, GOU Mingzhong, et al. Method of three-dimensional simulation for shield tunneling process and study of adjacent partition of overlapped segment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(1):273-279.(in Chinese))
- [4] 孙志岗. 地铁区间交叠小净距隧道施工力学效应研究[D]. 重庆:重庆大学,2017. (SUN Zhigang. Study on construction mechanical effect of overlapping metro tunnel with small interval[D]. Chongqing: Chongqing

- University, 2017.(in Chinese))
- [5] 王思洋. 并行盾构隧道下穿已有隧道的数值模拟及研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020. (WANG Siyang. Numerical simulation and study of parallel shield tunnel under existing tunnel[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.(in Chinese))
- [6] 杨成永,马文辉,彭华,等. 地铁双线盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J]. 铁道工程学报, 2018,35(7):91-98. (YANG Chengyong, MA Wenhui, PENG Hua, et al. Research on the settlement control of existing shield tunnels affected by construction of underneath dual shield tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018,35(7):91-98.(in Chinese))
- [7] 张海波,殷宗泽,朱俊高. 近距离叠交隧道盾构施工对老隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005,26(2):282-286. (ZHANG Haibo, YIN Zongze, ZHU Jungao. Numerical simulation of influence of new tunnel on short distance overlapped old tunnel during shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(2):282-286.(in Chinese))
- [8] AVGERINOS V, POTTS D M, STANDING J R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels[J]. Géotechnique, 2017,67(9):808-822.
- [9] 肖果. 盾构下穿既有隧道扰动效应分析[J]. 公路与汽运, 2020(5): 134-139, 144. (XIAO Guo. Analysis of the disturbance effect of existing tunneling under shield tunneling [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(5):134-139,144.(in Chinese))
- [10] 张孟喜,张靖,吴应明,等. 全风化岩层中双线盾构上穿邻近地铁隧道影响分析[J]. 土木工程学报, 2019,52(9):100-108. (ZHANG Mengxi, ZHANG Jing, WU Yingming, et al. Analysis of double-line shield tunnel over-crossing subway tunnel in completely weathered rock formation [J]. China Civil Engineering Journal, 2019,52(9):100-108. (in Chinese))
- [11] 廖少明,杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012,34(5):812-818. (LIAO Shaoming, YANG Yuheng. Deformation analysis and control of a running subway crossed by upper-and lower-shield in succession[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(5):812-818.(in Chinese))
- [12] 刘伟. 地铁区间重叠隧道近接施工数值分析[J]. 路基工程, 2019(3): 199-204. (LIU Wei. Numerical analysis on approaching construction of overlapping tunnel in metro sections[J]. Subgrade Engineering, 2019(3): 199-204. (in Chinese))
- [13] 范晓真,骆伟,王伊丽,等. 小净距上下重叠盾构隧道施工扰动数值分析[J]. 科学技术与工程, 2017,17(11): 108-114. (FAN Xiaozhen, LUO Yi, WANG Yili, et al. Numerical analysis of the construction disturbance of small-spacing overlapped shield tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(11): 108-114. (in Chinese))
- [14] 张海波. 软土地层小净距重叠隧道施工技术研究[J]. 山西建筑, 2019,45(13):119-120. (ZHANG Haibo. Study on construction technology of small distance overlapping tunnel in the soft soil[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45 (13):119-120.(in Chinese))
- [15] 奚灵智,高文杰,杨宇. 地铁重叠下穿既有隧道软土地基加固参数研究[J]. 建筑技术开发, 2020,47(23):158-161. (XI Lingzhi, GAO Wenjie, YANG Yu. Study on ground improvement of existing tunnel with overlapping underpass of subway[J]. Building Technology Development, 2020,47(23):158-161.(in Chinese))

(上接第39页)

- 113.(in Chinese))
- [13] 蒋超,吴冲,姜旭. 桥梁缆索高强钢丝均匀腐蚀及点蚀的规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018,46(12):1615-1621. (JIANG Chao, WU Chong, JIANG Xu. Experiment research on uniform corrosion and pitting corrosion of high-strength bridge wires[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(12): 1615-1621. (in Chinese))
- [14] 武汉材料保护研究所. 人造气氛腐蚀试验盐雾试验: GB/T10125—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. (Wuhan Research Institute Of Materials Protection. Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests: GB/T 10125—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese))