

文章编号: 1674-599X(2020)03-0043-07

## 断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究

姜克寒, 刘邦, 秦坤元, 周涛

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 泥水盾构隧道在断层破碎带地层中的施工较为复杂。为研究其盾构掘进性能, 依托长沙地铁 6 号线盾构隧道工程, 对其开挖工序进行数值模拟, 分析不同隧道掘进施工参数对地表竖向沉降变形的影响, 得到地表竖向变形图及沉降槽分布曲线。研究表明: 隧道掌子面前方土体的沉降值, 随着泥水仓压力的增大而减小, 但随着盾构机继续向前推进, 过大的泥水仓压力会对开挖地层产生较大的扰动, 导致沉降变形增大。注浆压力的增大会增加泥浆对围岩的加固作用, 增强围岩的整体稳定性, 减小地层的变形。盾构掘进速度越大, 地层所受扰动程度越大, 地表的沉降变形越大。该结果可为类似工程施工提供指导。

**关键词:** 断层破碎带; 泥水仓压力; 注浆压力; 掘进速度; 数值模拟

中图分类号: U452

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.007

### Study on the optimization for mud-water shield driving parameters in fault fracture zone

JIANG Ke-han, LIU Bang, QIN Kun-yuan, ZHOU Tao

(Sinohydro Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** The construction of mud-water shield tunnel in the fault fracture zone stratum is relatively complicated. To study the tunneling performance of shield, based on Changsha Metro Line 6 shield tunneling project, the numerical simulation of the excavation process is conducted to analyze the influence of tunneling construction parameters on the vertical subsidence and deformation of the ground. The vertical surface deformation diagram and settlement trough distribution curve show that with the increase of silo pressure, the settlement of soil in front of the tunneling face decreases, but the excessive pressure of mud silo can cause great disturbance to the excavated strata, resulting in the increase of settlement deformation as the shield machine continues to push forward. The increase of grouting pressure will enhance the reinforcement effect of mud on surrounding rocks, improve the overall stability of surrounding rocks and reduce the strata deformation. As the tunneling velocity rises, the disturbance degree of the stratum and the subsidence of the ground gradually increases. The optimized results of mud-water shield construction parameters in this study can provide technical guidance for analogous projects.

**Key words:** fault breakup zone; mud silo pressure; grouting pressure; excavation speed; numerical simulation

泥水仓泥浆压力、盾构掘进注浆压力及掘进速度等是保证隧道安全、高效施工的关键。为确保泥水盾构的使用性能, 研究泥水盾构参数对地层变形

十分必要。施工参数的选取会对土层的损失产生很大的影响, 因此, 需对施工参数进行严格控制和合理选取。目前, 针对盾构掘进参数优化控制的研究

收稿日期: 2020-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908234)

作者简介: 姜克寒(1982-), 男, 中国水利水电第八工程局有限公司高级工程师。

主要集中在2个方面:①在不同地质条件下,不同掘进参数对围岩变形的影响;②在掘进参数的优化措施及方法研究。张健<sup>[1]</sup>等人研究了盾构隧道施工时,地层深度和注浆压力等对地层变形的影响。魏纲<sup>[2]</sup>等人基于 Mindlin 解对盾构造成的地表沉降进行了计算。唐晓武<sup>[3]</sup>在此基础上,补充了刀盘摩擦造成地表沉降的计算公式。张润峰<sup>[4-5]</sup>等人通过工程实践,得到了不同盾构隧道的实测掘进参数,并对其影响因素和工程措施进行了分析。余志刚<sup>[6]</sup>等人研究了泥质粉砂岩地层条件下,泥水盾构掘进参数的变化规律,并进行了关联性分析。李超<sup>[7]</sup>等人采用 BP(Back Propagation, 简称为 BP)人工神经网络,建立了复合地层条件下,盾构掘进参数的预测模型。郑刚<sup>[8]</sup>等人在分析盾构掘进参数和对周围地层影响规律的基础上,根据参数对地层变形的影响程度进行排序,并且针对参数提出相应的控制措施。凌同华<sup>[9]</sup>等人研究不同循环进尺对断层段盾构隧道施工的影响,并进行验证和优化。朱合华<sup>[10]</sup>等人通过数值模拟等方法,研究了不同推进速度及不同螺旋机转速等情况下,施工参数对地层变形的影响。张恒<sup>[11-13]</sup>等人针对泥水仓泥浆压力和盾尾注浆2个参数,将盾构施工对地层变形的影响进行了详细的分析。周文波<sup>[14]</sup>等人采用神经网络,建立了盾构掘进参数的变形预测数学模型。杜鹃<sup>[15]</sup>等人基于层次聚类,提出了地下隧道施工中地表沉降致险因素的聚类机制。部分研究成果对盾构隧道施工的掘进参数进行了优化研究,但是对优化施工主要参数的研究鲜见。因此,本研究依托长沙地铁6号线六沟垅-文昌阁(六文)区间左、右线下穿湘江泥水盾构隧道,穿越 F085 主断层破碎带地层的盾构隧

道施工。拟通过 Midas/GTS NX 软件对其开挖进行模拟,对施工参数进行优化数值计算,得到地表竖向变形图和沉降槽分布曲线,分析不同参数对地层变形沉降的影响,获得最适宜的掘进参数,以期类似工程施工提供指导。

## 1 工程概况

长沙地铁6号线六文区间左、右线下穿湘江断层破碎带地层隧道工程。本区间隧道 YDK29+184~YCK29+556 穿越 F085 主断裂(372 m), YDK28+920~YDK29+184(264 m)和 YDK29+556~YDK29+660(104 m)穿越 F085 分支断裂及断裂影响带,穿越断裂及断裂影响带范围为 740 m。断裂带岩性为构造角砾岩和碎裂岩等,母岩为板岩和泥质板岩等。具有重新胶结现象,胶结极差,岩石强度极低。岩芯呈半岩半土状。岩体呈角砾结构、散体结构及碎裂结构等,完整性极差,稳定性差。根据鸭子铺隧道钻孔 ZK1-358 的资料,碎裂岩为灰色,岩芯呈碎屑状。岩石质量指标  $RQD=0$ , 岩石质量极差。岩体完整性指数为 0.09~0.13 m, 岩体极破碎,基本质量等级为 V 级。岩石天然单轴抗压强度平均为 1.6 MPa。

湘江段 F085 断裂带,与隧道轴线大角度相交,宽度约 300 m,倾向东,倾角约 80°,附近存在不明次生断裂、软弱夹层及裂隙,与湘江水体贯通,股状地下水会产生涌出或突涌的可能,故该地段掘进是本工程的难点。区间盾构隧道地层条件、尺寸及隧道位置关系如图 1 所示。

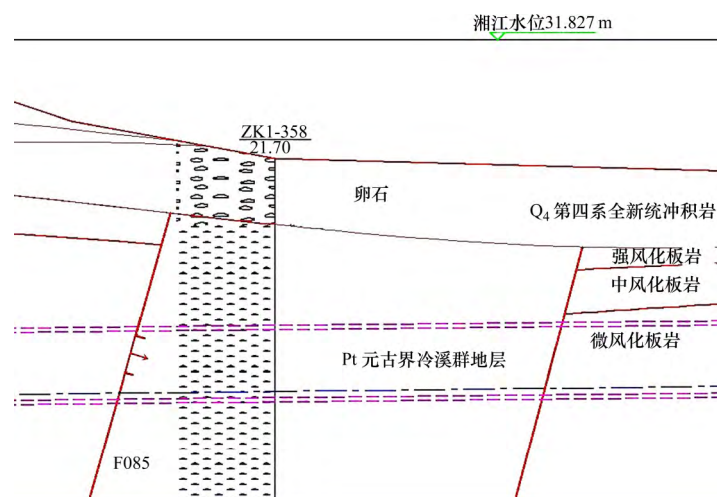


图1 地层条件剖面

Fig. 1 Section profile of the formation condition

2 掘进参数优化模型

根据现场盾构施工的工艺流程, 通过 Midas/GTS NX 软件对其开挖进行模拟。为确保充分考虑盾构开挖的影响范围, 且消除模型边界效应。根据实际工程现场条件, 确定模型边界范围, 以隧道开挖为中心点, 取 3~5 倍开挖洞径, X,Y,Z 方向分别取 80,80,60 m。取湘江水位深度为 9.8 m 位置, 从上往下分别为: 卵石和断层破碎带地层。土体应力应变关系采用修正摩尔-库伦准则。3D 有限元数值模型如图 2~5 所示。

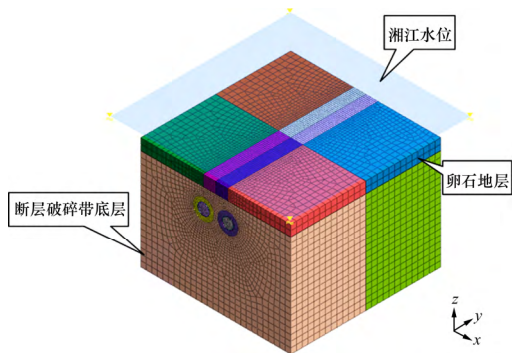


图 2 有限元模型整体  
Fig. 2 Overall diagram of the finite element model

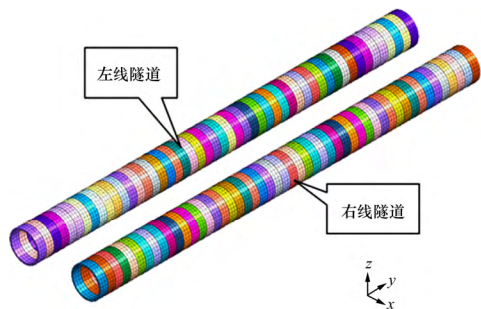


图 3 长沙地铁 6 号线主线位置关系  
Fig. 3 Structure mutual position relation of Changsha Metro Line 6

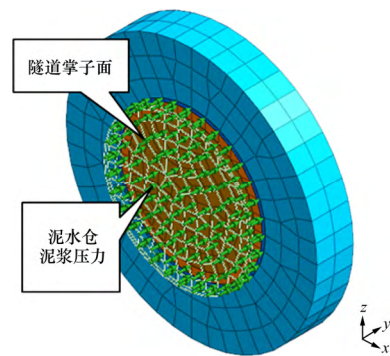


图 4 泥水仓压力示意  
Fig. 4 The mud silo pressure schematic

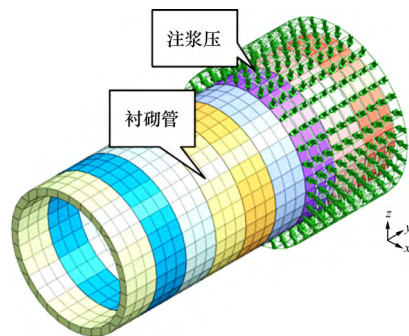


图 5 注浆压力示意  
Fig. 5 The schematic of grouting pressure

模型中采用的所有参数, 均根据地质勘探报告及相关设计资料获取, 本模型采用的地层及主要结构材料参数见表 1。为使各施工参数对地层的影响更为突出, 模拟施工过程中, 不考虑右线的变形, 仅比较 6 号线左线施工的模拟结果。模拟工况参数见表 2。

2.1 盾构掘进泥水仓压力

在泥水加压式盾构工法中, 通过在刀盘后方泥水仓内, 注入泥浆, 在泥水仓内形成一定大小的泥浆压力, 作用在隧道开挖掌子面上, 与掌子面处的水土压力保持平衡, 保障隧道掌子面土体的稳定性。选取泥水仓泥浆压力分别为 150,200,250, 300 kPa 4 种施工工况, 进行该区间施工的模拟。

表 1 模型地层参数

Table 1 Formation parameters of the model						
材料	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	弹性模量/MPa	单元
卵石	21.0	—	40.0	0.25	33.0	实体
断层破碎带	23.4	17.9	50.1	0.26	26.7	实体
隧道管片	23.5	—	—	0.20	32 500.0	实体
盾构外壳	78.5	—	—	0.30	216 000.0	板
注浆等代层	21.0	—	—	0.16	22 000.0	实体

表 2 模拟工况参数

Table 2 Simulated operating parameters

参数类型	泥水仓泥浆压力/kPa	注浆压力/kPa	掘进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )
Level-1	150	200	10
Level-2	200	250	20
Level-3	250	300	30
Level-4	300	350	40

不同泥水仓泥浆压力作用下,隧道左线施工过程中,对应隧道轴线位置的地表竖向变形如图 6 所示。  
从图 6 中可以看出,在盾构隧道左线施工过程中

中,引起对应隧道轴线位置的地表竖向变形较大。由于泥水仓泥浆压力较大时,隧道掌子面前方土体的沉降值要小于低泥水仓泥浆压力时的。表明:泥水仓泥浆压力可以控制掌子面前方土体沉降变形,但盾构机继续向前推进,泥水仓泥浆压力较大时,会对开挖地层产生较大的扰动,最大沉降值随着泥浆压力的增大而增加。当泥水仓泥浆压力分别为 150,200,250,300 kPa 时,对应左线隧道轴线位置的地表最大沉降变形值依次为: 11.46,11.69,11.77, 11.93 mm。因此,结合有限元数值模拟计算结果,该区间泥水仓泥浆压力设置为 250 kPa 较为合适。

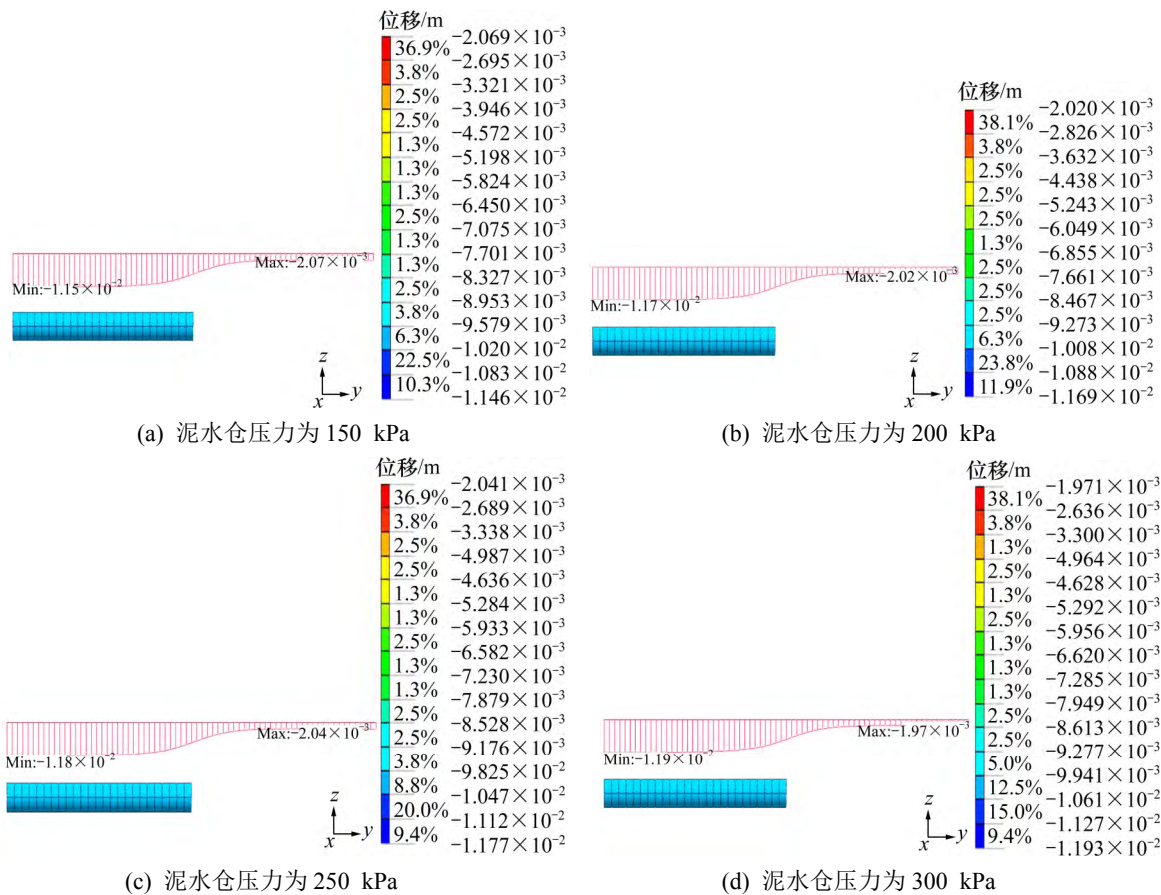


图 6 不同泥水仓压力下的地表竖向变形

Fig. 6 Vertical deformation of surface at different mud silo pressure

2.2 盾构掘进注浆压力

选取注浆压力分别为 150,200,250,300 kPa 4 种施工工况,对该区间盾构施工注浆压力参数的取值进行优化。不同注浆压力作用下,隧道左线施工完成后,地表竖向变形如图 7 所示。  
从图 7 可以看出,当选取盾构掘进注浆压力分别为 150,200,250,300 kPa 4 种施工工况,进行了模拟,最大地表竖向变形值依次为: 12.89,12.86,12.83,

12.80 mm。表明:地表最大变形值随注浆压力的增大而减小,但变化幅度较小。结合现场的地层条件,参考类似长沙区域盾构经验,将该区间内的注浆压力设置为 250 kPa 较为合适。

2.3 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,对该区间断层破碎带地层盾构施工掘进速度参数的取值进行优化分析。在不同的盾构



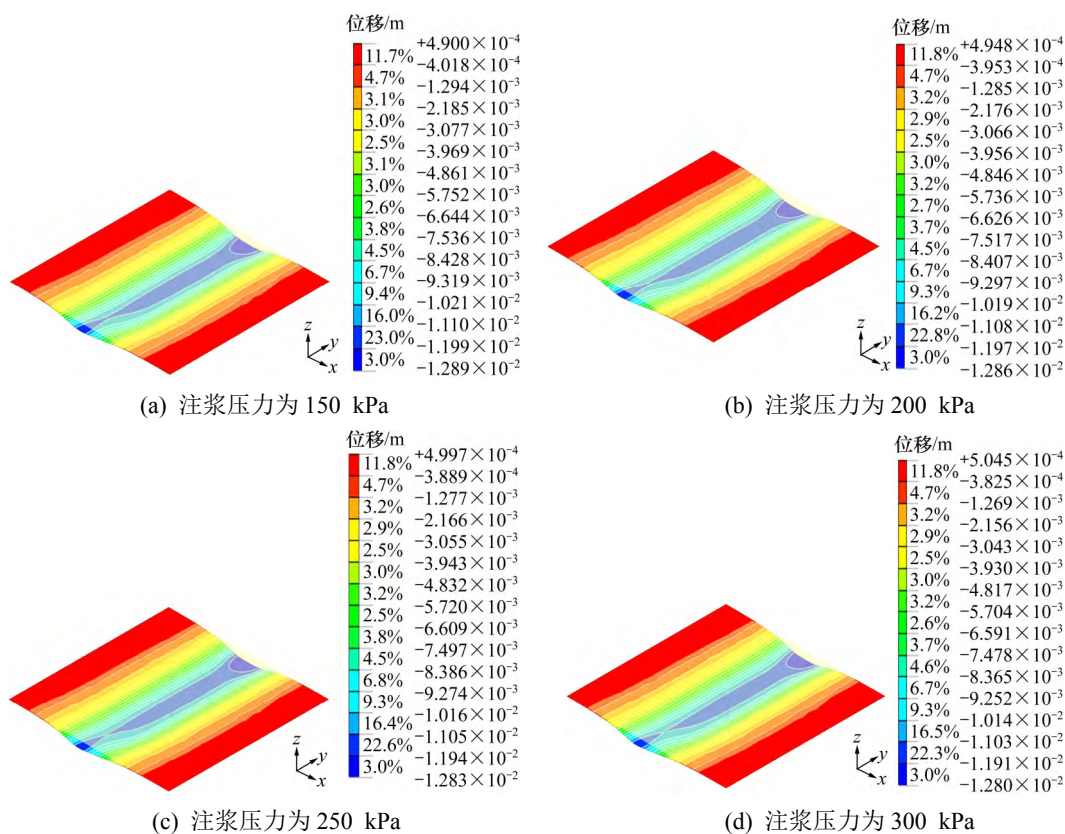


图7 各注浆压力下的地表竖向变形

Fig. 7 Vertical deformation of the surface at different of grouting pressure

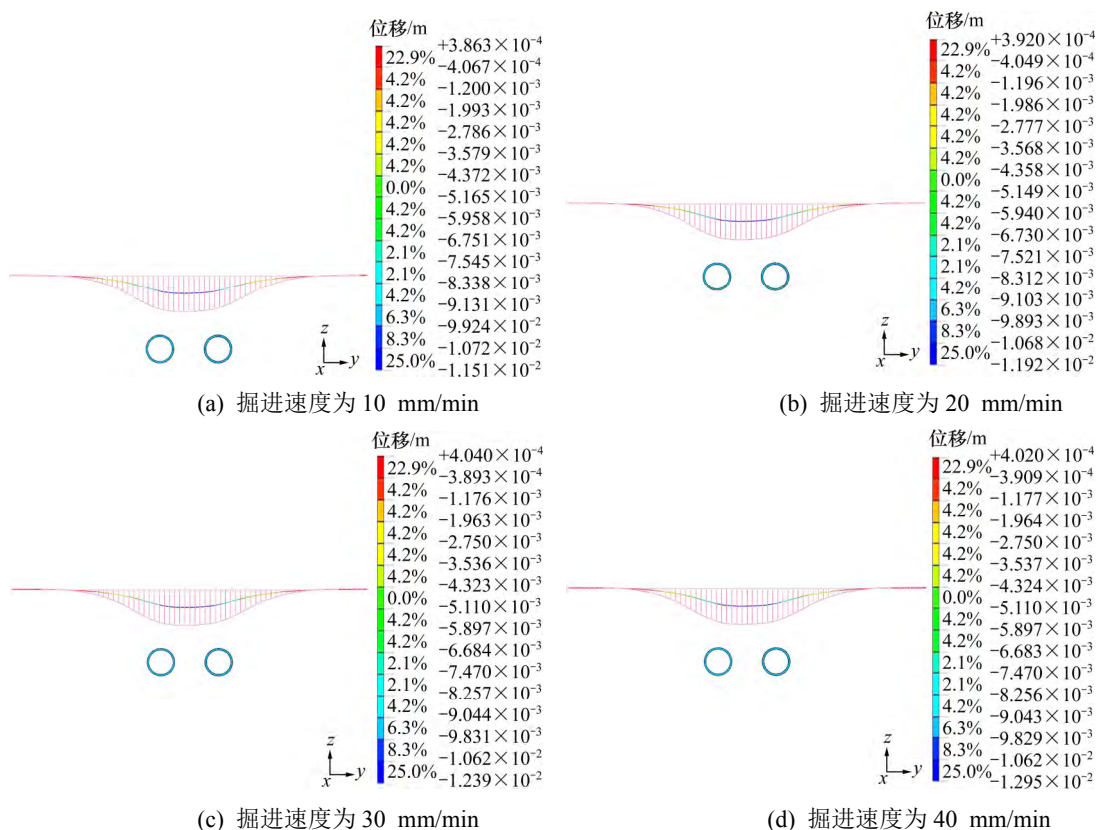


图8 各掘进速度下的地表沉降槽沉降变形

Fig. 8 Surface sink distribution curve at different driving speed

掘进速度下,隧道左线施工完成后,垂直隧道轴线方向的地表沉降槽分布曲线如图8所示。

从图8中可以看出,当盾构掘进速度分别为10,20,30,40 mm/min时,地表沉降槽最大沉降变形值依次为:11.51,11.92,12.39,12.95 mm。因此,盾构隧道施工过程中,盾构掘进速度越大,地层所受扰动程度和地表最大沉降值越大。该区间盾构穿越断层破碎带,岩体破碎,渗透性强,掘进速度的影响较大。需选择合适的盾构掘进速度,使得泥水平衡盾构掘进过程中,刀盘开挖系统、泥水仓泥浆环流系统、盾构机千斤顶推力系统、同步注浆系统、渣土输送系统及渣土改良系统等完美结合,共同保持动态平衡,实现盾构隧道安全经济高效的施工。所以,根据本模型的计算结果和现场工程地质勘察报告及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 mm/min为宜。

### 3 结论

依托长沙地铁6号线六文区间左、右线下穿湘江泥水盾构隧道,穿越断层破碎带的施工工程。通过Midas/GTS NX软件,对其开挖进行模拟,得到的结论为:

1) 泥水仓泥浆压力较大时,隧道掌子面前方土体的沉降值要小于低泥水仓泥浆压力时的。表明:泥水仓泥浆压力可以控制掌子面前方土体沉降变形。但随着盾构机继续向前推进,过大泥水仓压力会对开挖地层产生较大的扰动,从而导致沉降变形增大。

2) 增大注浆压力,地表竖向变形会有所减小,但对地层的最终变形值影响不大。

3) 盾构隧道施工过程中,盾构掘进速度越大,地层所受扰动程度和地表最大沉降值也越大。所以需控制盾构掘进速度为最优掘进速度,以实现盾构隧道安全经济高效的施工。

4) 该工程泥水仓压力取250 kPa,注浆压力取250 kPa,掘进速度取20 mm/min。可为类似工程穿越断层破碎带地段盾构工程提供指导。

#### 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,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(S1): 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. (in Chinese))
- [3] 唐晓武,朱季,刘维,等.盾构施工过程中的土体变形研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):417-422. (TANG Xiao-wu, ZHU Ji, LIU Wei, et al. Research on soil deformation during shield construction process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 417-422. (in Chinese))
- [4] 张润峰,梁荣柱,张献民,等.下穿既有建筑期间盾构施工参数分析[J].浙江大学学报:工学版,2016,50(3):551-558. (ZHANG Run-feng, LIANG Rong-zhu, ZHANG Xian-min, et al. Analysis on shield construction parameters during down-crossing existing buildings[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2016, 50(3): 551-558. (in Chinese))
- [5] 彭柏兴,何天铭,王会云,等.南湖路湘江隧道盾构施工影响因素及工程措施[J].交通科学与工程,2012, 28(2): 67-71. (PENG Bai-xing, HE Tian-ming, WANG Hui-Yun, et al. The influence and the treatment for the construction of Xiangjiang River shield tunnel at Nanhu Road[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, 28(2): 67-71. (in Chinese))
- [6] 余志刚.泥质粉砂岩地层泥水盾构掘进参数变化规律及关联性分析[J].施工技术,2018,47(1):116-121. (YU Zhi-gang. Change rule and correlation analysis of slurry shield tunneling parameters under argillaceous siltstone formation[J]. Construction Technology, 2018, 47(1): 116-121. (in Chinese))
- [7] 李超,李涛,李正,等.基于BP神经网络的复合地层盾构掘进参数预测与分析[J].土木工程学报,2017,50(S1): 145-150. (LI Chao, LI Tao, LI Zheng, et al. Prediction and analysis of shield boring parameters in a mixed ground based on BP neural network[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 145-150. (in Chinese))
- [8] 郑刚,路平,曹剑然.基于盾构机掘进参数对地表沉降影响敏感度的风险分析[J].岩石力学与工程学报,

- 2015(S1):3604–3612.(ZHENG Gang, LU Ping, CAO Jian-ran. Risk analysis based on the parameters sensitivity analysis for ground settlement induced by shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(S1):3604–3612. (in Chinese))
- [9] 凌同华,周凯,谢伟华,等.深埋隧道断层段循环进尺优化模拟研究[J].交通科学与工程,2016,32(2):73–78.(LING Tong-hua, ZHOU Kai, XIE Wei-Hua, et al. Study on the optimization simulation for cyclic drilling footage of deep tunnel fault[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2016, 32(2): 73–78. (in Chinese))
- [10] 朱合华,徐前卫,廖少明,等.土压平衡盾构法施工参数的模型试验研究[J].岩土工程学报,2006(5):553–557.(ZHU He-hua, Xu Qian-wei, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on working parameters of EPB shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(5):553–557. (in Chinese))
- [11] 张恒,陈寿根,邓希肥.盾构掘进参数对地表沉降的影响分析[J].现代隧道技术,2010,47(5):48–53.(ZHANG Heng, CHEN Shou-gen, DENG Xi-fei. Analysis of the influence of shield driving parameters on ground settlements[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(5):48–53. (in Chinese))
- [12] 宋天田,周顺华,徐润泽.盾构隧道盾尾同步注浆机理与注浆参数的确定[J].地下空间与工程学报,2007,4(1):130–133.(SONG Tian-tian, ZHOU Shun-hua, XU Run-ze. Mechanism and determination of parameters of synchronous grouting in shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 4(1):130–133. (in Chinese))
- [13] 孙玉永,周顺华,向科,等.近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究[J].中国铁道科学,2010,31(1):54–58.(SUN Yu-yong, ZHOU Shun-hua, XIANG Ke, et al. Study on the construction parameters of shield tunnelling in short-distance undercrossing the existing tunnel[J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 54–58. (in Chinese))
- [14] 周文波,胡珉.盾构法隧道施工主要参数控制方法研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(S1):2430–2433.(ZHOU Wen-bo, HU Min. Control study on major parameters for shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S1): 2430–2433. (in Chinese))
- [15] 杜娟,景恒青,何仁志.隧道施工中地表沉降致险因素识别机制研究[J].公路工程,2019,44(6):38–45,56.(DU Juan, JING Heng-qing, HE Ren-zhi. Identification mechanism research of ground subsidence risk factors in tunnel construction based on hierarchical clustering[J]. Highway Engineering, 2019, 44(6): 38–45, 56. (in Chinese))