

黄土地区盾构隧道下穿高铁路基掘进参数优化研究

伍智超, 黄超

中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年11月22日; 录用日期: 2022年12月12日; 发布日期: 2022年12月26日

摘要

为研究黄土地区盾构隧道下穿高铁路基掘进参数对地层的影响, 依托西安地铁1号线盾构隧道工程, 进行数值模拟分析, 研究黄土地区盾构隧道下穿高铁路基施工中盾构土仓压力、注浆压力、注浆量和掘进速度对地层的影响。结果表明: 土仓压力增大, 地层的竖向位移减小; 注浆压力与注浆量的增加会减少地层的沉降变形, 但影响较小; 盾构掘进速度越大, 地层扰动越大, 地层沉降越大。本文所研究的盾构掘进参数优化可为黄土地区类似施工提供参考。

关键词

黄土地区, 盾构施工, 掘进参数, 数值模拟

Study on Optimization of Tunneling Parameters of Shield Tunneling Undercrossing High-Speed Railway Subgrade in Loess Area

Zhichao Wu, Chao Huang

Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Nov. 22nd, 2022; accepted: Dec. 12th, 2022; published: Dec. 26th, 2022

Abstract

In order to study the influence of the excavation parameters of the shield tunneling undercrossing the high-speed railway subgrade in the loess area on the stratum, the numerical simulation analy-

sis is carried out based on the shield tunneling project of Xi'an Metro Line 1 to study the influence of the shield tunneling undercrossing the high-speed railway subgrade in the loess area on the stratum due to the shield tunneling pressure of soil warehouse, grouting pressure, grouting amount and tunneling speed. The numerical results show that the vertical displacement of the stratum decreases with the increase of the silo pressure; the increase of grouting pressure and grouting amount will reduce the settlement deformation of the stratum, but the influence is small; the greater the shield tunneling speed is, the greater the stratum disturbance is, and the greater the stratum settlement is. The optimization of shield tunneling parameters studied in this paper can provide a reference for similar construction in the loess areas.

Keywords

Loess Area, Shield Construction, Boring Parameter, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市地下交通的迅速发展,盾构法在基础设施建设中应用得越来越广泛。由于城市交通线路密集发展,新建隧道下穿建(构)筑物已成为常态,盾构法施工条件复杂,为保证隧道开挖过程中建(构)筑物和地层变形稳定,因此必须对影响地层稳定的掘进参数进行优化。由于黄土其特殊的工程性质,遇水易软化和垂直节理发育,所以研究黄土地区盾构下穿高速铁路基掘进参数优化研究具有实际意义。

现有学者针对类似工程已经开展了大量的研究。刘建国[1]通过土力学理论,对盾构施工引起黄土地层变形的因素进行了分析,得出了各因素对地层变形的影响规律;何川[2]等通过室内盾构掘进模拟试验,分析了盾构施工关键参数以及黄土地层盾构掘进对地层扰动情况;曹振[3]等通过 FLAC3D 数值模拟研究了黄土地区盾构下穿护城河引起的拱桥变形,得出施工前需对拱桥下层地层加固才能保证拱桥安全稳定的结论;朱才辉[4]等通过 APDL 编制有限元模型对黄土地区盾构施工不同施工参数下引起的地层沉降进行了规律性研究和探讨,得出了地面沉降预测公式;江杰[5]等依托实际工程,对泥水平衡盾构下穿既有地铁中的注浆量、注浆压力和掘进速度优化进行了分析;林春金[6]等通过 PSO-BP 神经网络对掘进参数对地层变形的敏感性进行了分析;刘维正[7]等通过数值模拟研究盾构下穿施工不同注浆压力和土仓压力对桥架桥的变形的影响。

综上,盾构下穿建(构)筑物导致地层变形跟掘进参数、地层参数等多种因素有关,如何分析掘进参数对地层变形的影响以及进行精细化建模,是分析黄土地区盾构下穿高速铁路基对地层变形影响的关键。因此,本研究以西安市某区间盾构下穿施工为依托,采用 Midas GTS 对盾构下穿施工进行模拟,对黄土地区盾构下穿掘进参数进行优化,以便得到合适的掘进参数,为相关黄土地区盾构下穿施工提供指导。

2. 工程概况

西安地铁一号线秦都~宝泉路区间线路沿彩虹二路地下敷设,由南向北依次穿越咸阳西货场专用线(三股道有砟轨道)、陇海线(五股道有砟轨道)、徐兰高铁(四股道无砟轨道)后接入秦都站。区间总长约 673 m(双延米),线间距 19.27 m,采用盾构法施工;隧道内径 $\Phi 5.4$ m、管片厚度 0.3 m、管片 6 分块、管片宽度 1.5 m,采用弯螺栓连接,错缝拼装。线路与高铁交角约为 93° ,下穿段落位于咸阳秦都站站房西侧。

隧道拱顶距离高铁 CFG 桩底 3.2 m, 与徐兰高铁(4 股道)轨面竖向净距离为 18.72 m; 距陇海铁路(5 股道)轨面竖向净距为 20.30 m; 距咸阳西货场线轨面竖向净距为 20.8 m。穿越段地质地层自上而下依次为素填土、新黄土、古土壤、细砂、粉质黏土、细砂等, 隧道穿越地层主要为粉质粘土, 拱顶以上 1.5 m 为粉质黏土, 隧道拱底下为密实细砂层, 地下水位于隧道拱顶以上约 6 m。地铁区间隧道与铁路平面位置关系见图 1。

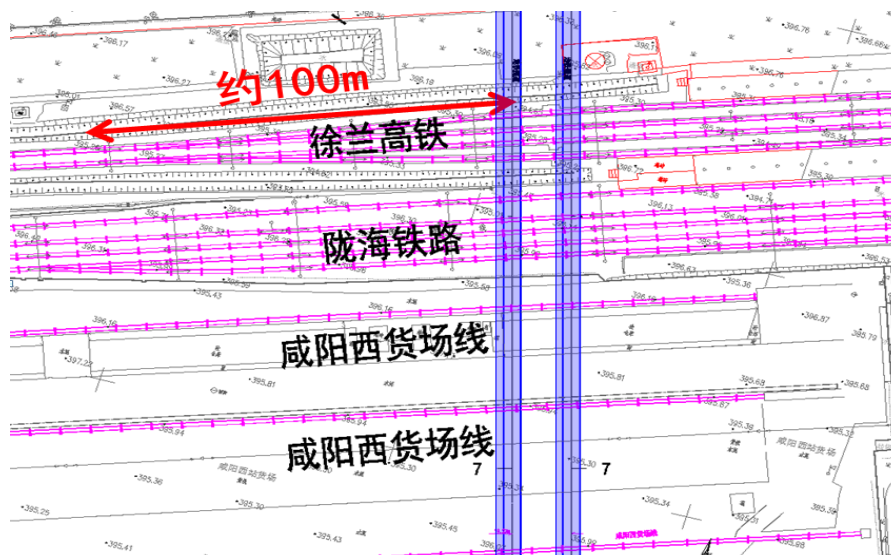


Figure 1. Diagram of plane location relationship between subway section tunnel and railway
图 1. 地铁区间隧道与铁路平面位置关系图

3. 掘进参数优化模型

3.1. 几何模型建立

本文采用 Midas/GTS NX 建立整体三维有限元模型进行数值分析。模型以西安地铁 1 号线盾构隧道掘进方向为 Y 轴, 垂直隧道掘进方向为 X 轴, 竖向为 Z 轴建立计算坐标系。为充分考虑盾构开挖的影响范围, 且消除模型边界效应, 确定 X 向取 80 m, Y 向取 80 m, Z 向取为 60 m。模型侧面施加水平约束, 底部施加水平和垂直约束, 地层表面为自由面。根据实际盾构掘进过程, 构建注浆等代层和注浆加固圈, 对盾构外壳、盾构机推力、注浆压力和土仓压力进行模拟。设置盾构外壳参数为钢外壳, 作用在掌子面上的土仓压力为面压力, 作用在管片外侧和围岩壁上的注浆压力为面压力, 而盾构机推力以面压力的形式作用在管片上, 推力的方向为盾构掘进的反方向, 调整注浆量从而改变注浆加固圈增强程度, 如图 2~6。

为了得到不同掘进参数如何影响地层变形, 分别模拟西安地铁 1 号线左线隧道先行施工、右线隧道后行施工对黄土地层变形的影响, 不同工况模拟参数如表 1。

Table 1. Table of parameters under simulated working conditions
表 1. 模拟工况参数表

参数类型	Level-1	Level-2	Level-3	Level-4
土仓压力(bar)	1.5	2.0	2.5	3.0
注浆压力(bar)	2.0	2.5	3.0	3.5
注浆量(m ³)	5.0	6.0	7.0	8.0
掘进速度(mm/min)	10	20	30	10

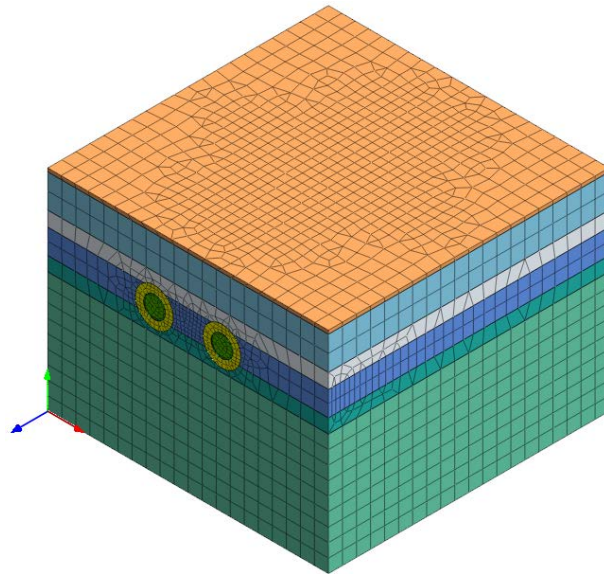


Figure 2. Schematic representation of the overall modeling
图 2. 总体建模示意图

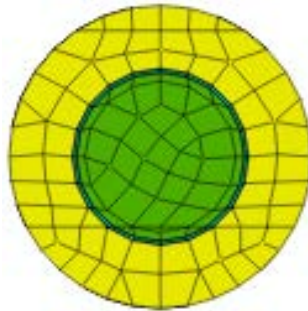


Figure 3. Cross sectional diagram of tunnel construction area
图 3. 隧道施工区横断面图

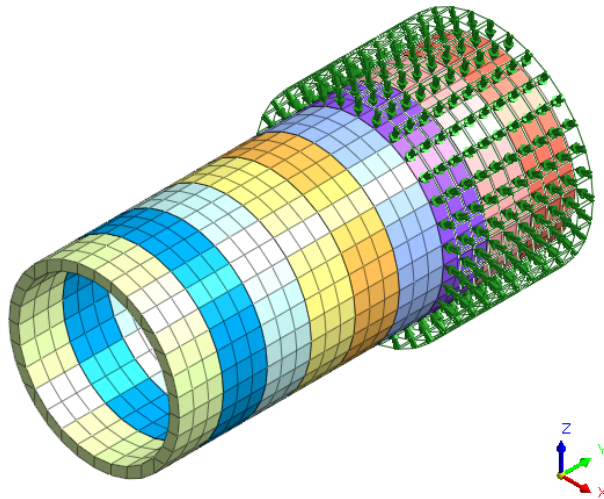


Figure 4. Schematic diagram of grouting pressure
图 4. 注浆压力示意图

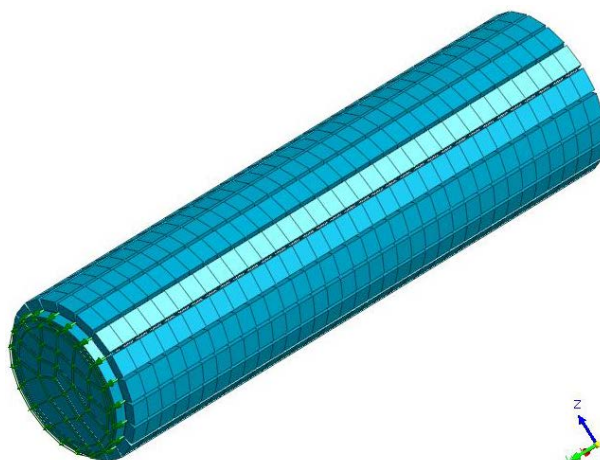


Figure 5. Schematic diagram of parameter optimization model of pressure of soil warehouse

图 5. 参数优化模型土仓压力示意图

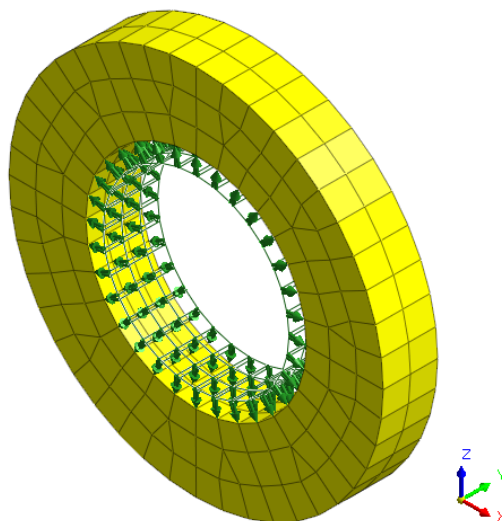


Figure 6. Schematic diagram of grouting reinforcement area of parameter optimization model

图 6. 参数优化模型注浆加固区示意图

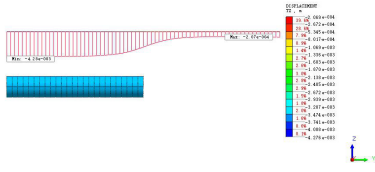
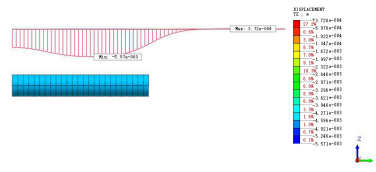
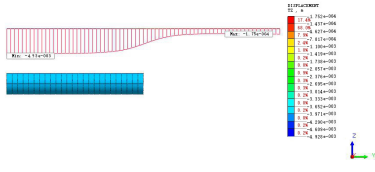
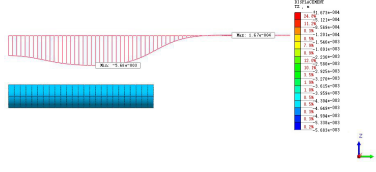
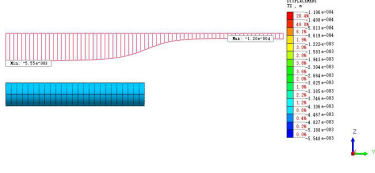
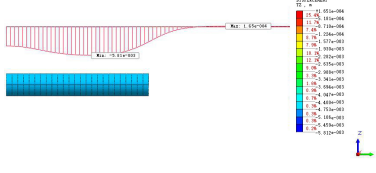
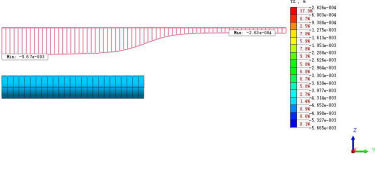
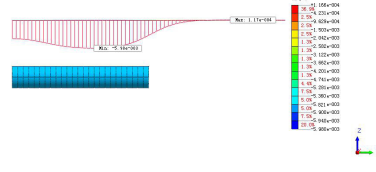
3.2. 土仓压力

对系列梯度土仓压力作用下隧道左、右线掘进中对应隧道轴线位置地表沉降值进行分析, 如表 2。

可以从云图中发现, 土仓压力的变化会对盾构施工引起地层变形产生影响, 随着土仓压力的增大隧道地表最大沉降变形值不断增大。盾构左线下穿掘进过程中, 会扰动右线隧道的围岩, 导致变形并降低其整体稳定性, 所以在盾构隧道右线施工过程中, 引起对应隧道轴线位置处地表竖向变形较大。当土仓压力分别为 150 kPa、200 kPa、250 kPa、300 kPa 时, 对应左线隧道轴线位置地表最大沉降变形值依次为: 4.28 mm、4.93 mm、5.55 mm、5.67 mm; 对应右线隧道轴线位置地表最大沉降变形值依次为: 5.57 mm、5.68 mm、5.81 mm、5.98 mm。

总结土仓压力改变时数值计算结果, 发现土仓压力越大, 隧道地表沉降越大, 结合有限元数值模拟计算结果与现场施工中的即时调整信息, 土仓压力为 180 KPa~200 KPa 比较合理。

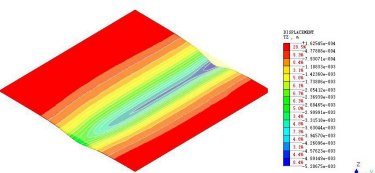
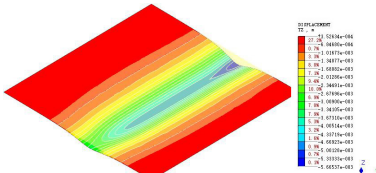
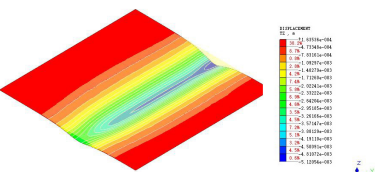
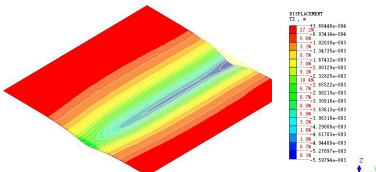
Table 2. Vertical deformation diagram of ground surface at tunnel axis position
表 2. 隧道轴线位置地表竖向变形图

土仓压力	左线位移图	右线位移图	最大沉降值(左; 右)
150 KPa			4.28 mm; 5.57 mm
200 KPa			4.93 mm; 5.68 mm
250 KPa			5.55 mm; 5.81 mm
300 KPa			5.67 mm; 5.98 mm

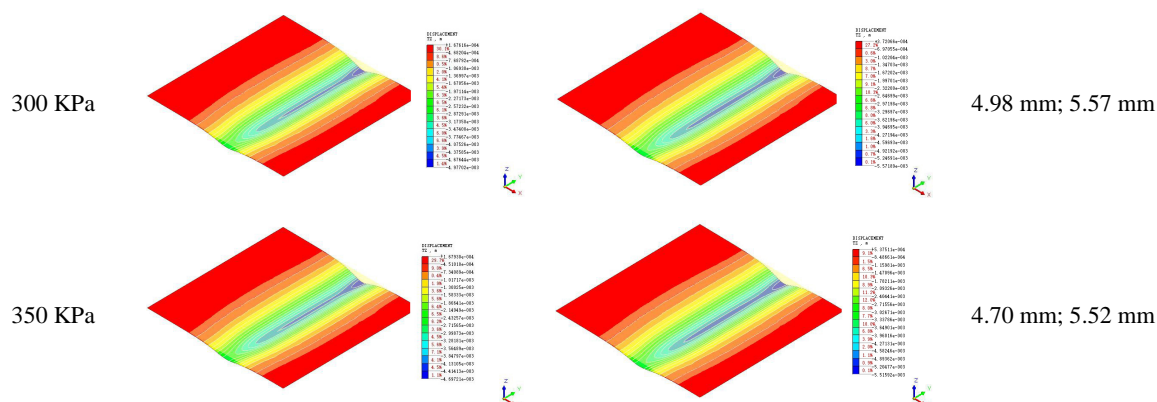
3.3. 注浆压力

对系列梯度注浆压力作用下隧道左、右线掘进完成后地表沉降进行分析, 如表 3。

Table 3. Vertical deformation diagram of ground surface after construction of left and right tunnel lines
表 3. 隧道左、右线施工完成地表竖向变形图

注浆压力	左线位移图	右线位移图	最大沉降值(左; 右)
200 KPa			5.21 mm; 5.67 mm
250 KPa			5.12 mm; 5.60 mm

Continued



由地表沉降云图可以看出, 注浆压力可以减小地表沉降值, 由于当隧道衬砌管片脱离盾尾后, 通过同步注浆的作用, 对开挖洞室提供支护应力, 减小原有地层由于隧道开挖而发生的应力损失, 对一定范围内的围岩提供支护作用, 从而减小地层的变形。盾构隧道左线施工过程中, 会对周边地层造成扰动, 产生变形并降低其整体稳定性, 所以在盾构隧道右线施工过程中, 引起地层的变形会与左线施工引起地层的变形相叠加, 地表最大沉降值的位置逐渐向左右线隧道中间位置偏移。当注浆压力分别为 200 kPa、250 kPa、300 kPa、350 kPa 时, 左线施工完成后地表最大沉降变形值依次为: 5.21 mm、5.12 mm、4.98 mm、4.70 mm; 右线施工完成后地表最大沉降变形值依次为: 5.67 mm、5.60 mm、5.57 mm、5.52 mm。

总结数值计算结果, 注浆压力越大, 地表最大沉降值越小, 但变化区间小, 参考现场条件并结合相关黄土地区盾构下穿经验, 认为注浆压力为 250 kPa~350 kPa 较为合适。

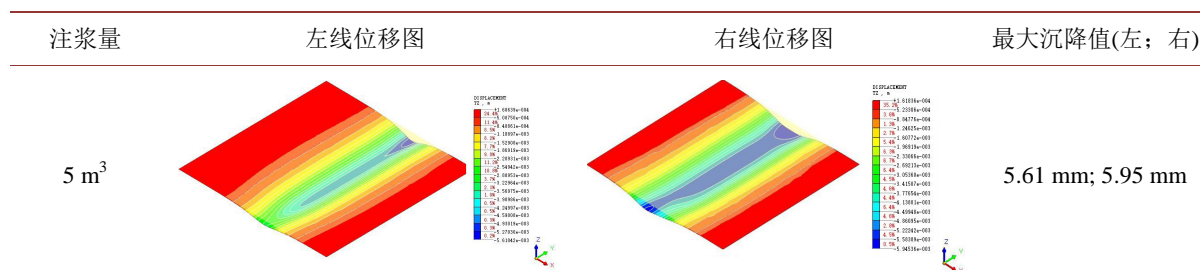
3.4. 注浆量

对系列梯度注浆量下隧道左、右线施工完成后地表竖向变形, 如表 4。

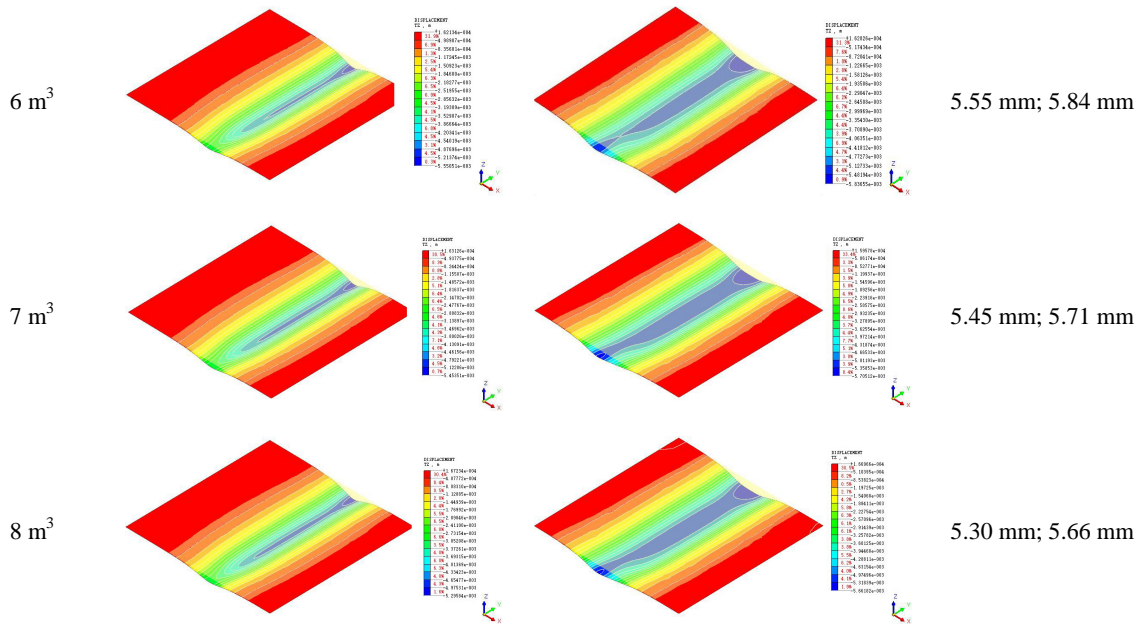
由地表沉降云图可以看出, 注浆量的增加可以减小地表沉降值。当注浆浆液填满盾尾间隙, 在注浆压力的作用下, 浆液会不断向开挖地层中发生渗透扩散, 形成注浆压力支护围岩的同时, 也会对渗透区内的土体进行加固, 增大注浆渗透区内岩土体的强度和稳定性, 并且随着注浆量的增多, 注浆加固区的直径会越大。当盾构注浆量分别为 5 m^3 、 6 m^3 、 7 m^3 、 8 m^3 时, 隧道左线施工完成后, 地表最大沉降变形值依次为: 5.61 mm、5.55 mm、5.45 mm、5.30 mm; 隧道右线施工完成后, 地表最大沉降变形值依次为: 5.95 mm、5.84 mm、5.71 mm、5.66 mm。综合有限元数值计算结果, 以及对类似工程的参考, 将本区间盾构掘进的注浆量控制在 $6.5 \text{ m}^3 \sim 7.3 \text{ m}^3$ /环为宜。

Table 4. Vertical deformation diagram of ground surface after construction of left and right tunnel lines

表 4. 隧道左、右线施工完成地表竖向变形图



Continued



3.5. 盾构掘进速度

对系列梯度盾构掘进速度下隧道左、右线掘进完成后垂直隧道轴线方向地表沉降槽分布进行分析, 如表 5。

Table 5. Distribution curve of surface settlement trough after completion of left and right tunnel lines
表 5. 隧道左、右线施工完成后地表沉降槽分布曲线

掘进速度	左线位移图	右线位移图	最大沉降值(左; 右)
10 mm/min			4.67 mm; 5.41 mm
20 mm/min			4.81 mm; 5.54 mm
30 mm/min			5.08 mm; 5.62 mm
40 mm/min			5.21 mm; 5.74 mm

由地表沉降槽分布曲线图可以看出,掘进速度越快,地表沉降槽最大沉降值越大。在盾构掘进过程中,要想使掘进速度的加快,盾构机推力、刀盘扭矩及土仓压力需要加大,对同步注浆的及时性要求也越高,所以盾构施工对隧道周围地层的扰动程度和扰动范围会随之加大,致使围岩性质变差,所以盾构掘进速度越快,地层的稳定性越差,地表最大沉降值也越大。当盾构掘进速度分别为 10 mm/min、20 mm/min、30 mm/min、40 mm/min,隧道左线施工完成后,垂直隧道轴线方向地表沉降槽最大沉降变形值依次为:4.67 mm、4.81 mm、5.08 mm、5.21 mm;隧道右线施工完成后,地表沉降槽最大沉降变形值依次为:5.41 mm、5.54 mm、5.62 mm、5.74 mm。

结合计算结果,以及对类似工程的参考,本研究区间掘进速度保持在 25 mm/min~35 mm/min 较为合适。

4. 结论

通过有限元模型,对黄土地区盾构下穿高铁路基掘进参数进行优化,根据左、右线盾构掘进引起的地层沉降变形,对土仓压力、注浆压力、注浆量与掘进速度进行分项研究,得到结论如下:

1) 最适宜掘进参数:土仓压力为 180 KPa~200 Kpa,注浆压力为 250 kPa~350 kPa,注浆量为 $6.5 \text{ m}^3 \sim 7.3 \text{ m}^3$ /环,掘进速度为 25 mm/min~35 mm/min。为类似黄土地区盾构穿越高铁路基工程掘进参数提供依据。

2) 盾构土仓压力增大,导致对应隧道轴线位置处地表竖向变形增大,左线隧道的施工会增大右线隧道最终地表沉降。

3) 盾构注浆压力与注浆量的增大,导致地表最大沉降值减小,但是变化幅度较小。

4) 盾构掘进速度的增大,导致地表沉降槽沉降变形增大。在隧道施工过程中,既要控制沉降量,也要保证掘进速度,因此只有保持掘进速度为最适宜掘进速度,才能保证工程的安全性与及时性。

参考文献

- [1] 刘建国. 地铁黄土地层中盾构隧道地表沉降控制技术研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 141-146.
- [2] 何川, 李讯, 江英超, 方勇, 谭准. 黄土地层盾构隧道施工的掘进试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1736-1743.
- [3] 曹振, 杨锋, 张宁. 黄土盾构下穿护城河拱桥 FLAC3D 预测与施工安全防控技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(12): 1264-1270.
- [4] 朱才辉, 李宁, 张志强. 西安黄土地层盾构施工诱发地面沉降规律分析与预测[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1087-1095.
- [5] 江杰, 龙逸航, 邢轩伟, 王顺苇. 富水圆砾地层盾构下穿既有地铁隧道掘进参数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1828-1836.
- [6] 林春金, 杨晓达, 龚英杰, 丁万涛, 程旭东, 刘运生. 基于 PSO-BP 的土压盾构土仓压力预测模型及掘进参数敏感性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1220-1233.
- [7] 刘维正, 孙康, 戴晓亚, 艾国平, 雷涛. 地铁盾构长距离下穿对既有铁路框架桥影响的数值与实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 208-218.