

盾构下穿既有双线隧道变形控制分析

彭敏敏

(中铁十八局集团第一工程有限公司, 河北 保定 072750)

摘要: 依托广州地铁22号线工程, 通过数值模拟探究了盾构下穿既有双线隧道时的变形行为, 分析了不同注浆压力和掌子面支护力下, 既有双线隧道和地表的变形规律。基于数值模拟结果, 给出了实际工程中注浆压力和掌子面支护力选用依据, 并取得了良好应用效果。研究表明: 既有隧道纵向变形曲线呈单峰分布, 最大沉降位于新建隧道拱顶对应位置; 地表变形建隧道纵向呈单谷(沉降)或单峰(隆起)分布, 最小沉降或最大隆起位于既有双线隧道中间位置; 既有隧道、地表沉降和注浆压力、掌子面支护力呈负相关, 隆起和注浆压力、掌子面支护力呈正相关。

关键词: 盾构下穿; 双线隧道; 注浆压力; 掌子面支护力; 变形控制

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

Analysis on Deformation Control of Shield Tunneling under Existing Double-line Tunnel

PENG Minmin¹

(China Railway 18th Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

Abstract: Based on Guangzhou Metro Line 22, the deformation behavior of shield tunneling under the existing double-line tunnel was explored by numerical simulation. The deformation law of the existing double-line tunnel and the ground surface under different grouting pressures and tunnel face support forces was analyzed. Based on this, the selection basis of grouting pressure and support force in engineering was given, and good application effect was obtained. The results show that the longitudinal deformation curve of the existing tunnel is unimodal, and the maximum settlement is located at the corresponding position of the new tunnel vault. The surface deformation is distributed in a single valley (settlement) or single peak (uplift) along the longitudinal direction of the new tunnel, and the minimum settlement or maximum uplift is located in the middle of the existing double-line tunnel. The settlement of the existing tunnel and the surface are negatively correlated with grouting pressure and supporting force, while the uplift is positively correlated with grouting pressure and supporting force.

Key words: shield tunneling; double-line tunnel; grouting pressure; tunnel face support force; deformation control

随着城市轨道交通的迅速发展, 新建隧道下穿既有隧道的需求日渐增大。新建隧道施工期间, 不可避免地对既有隧道造成扰动。处于运营期的既有隧道对结构安全有着极高要求, 对新建隧道的施工扰动极为敏感, 这对新建隧道的施工控制提出了较高要求。因此, 众多学者对新建隧道下穿既有隧道造成的变形规律以及变形控制措

施进行了探究。王坚^[1]通过现场监测、理论分析及数值模拟, 探究盾构下穿既有隧道位移及土体沉降规律。刘旭全等^[2]通过对盾构下穿既有隧道变形控制进行现场试验, 分析了既有隧道变形规律, 提出盾构掘进施工参数动态值范围和既有隧道变形控制技术措施。杨荟斯等^[3]通过数值模拟, 分析了下穿隧道施工中既有运营隧道沉降、

收稿日期: 2024-01-04

作者简介: 彭敏敏, 工程师, 本科, 研究方向为地铁车站施工管理

侧向位移的变化规律以及盾构施工参数对既有隧道的影响。于群^[4]通过理论分析、数值模拟、现场监测分析了新建隧道下穿既有隧道的过程发展规律,并对各因素的影响规律进行了探究。来弘鹏等^[5]考虑盾构自重及土压力分布特征,建立了盾壳摩擦力计算方法,并将其引入 FLAC 3D 有限差分软件,探究了摩擦力对盾构下穿既有隧道的影响。田金科^[6]通过理论方法和数值模拟探究了不同因素下盾构下穿对既有隧道的影响,并以监测数据作为样本给出了既有隧道拱底水平位移与沉降同时处于最优条件下的盾构施工参数。罗文亮^[7]通过既有隧道钢环加固、自动化监测技术、试验段确定指导性施工参数、下穿施工参数控制、跟踪补偿注浆等措施,成功实现了无地面监测条件下的富水软土地层中盾构小净距斜交下穿既有运营隧道的实施。胡秋斌^[8]采用数值模拟探究了新建盾构隧道下穿既有暗挖隧道时,注浆加固、管棚加固、综合加固对既有隧道受力变形的控制效果。崔玉龙^[9]通过数值模拟和现场试验,对既有隧道加固措施、盾构对地层适应性、掘进参数、隧道变形进行了研究。高利宏^[10]通过现场监测和数值模拟,分析了新建左、右线依次穿越过程中既有双线隧道沉降变形规律。金大龙^[11]通过理论分析、数值模拟、模型试验、现场监测探究了隧道群下穿既有隧道力学响应规律,并分析了盾构单线及多线下穿既有隧道变形控制方法。

综上所述,盾构下穿既有隧道变形规律以及控制方法逐渐完善。但不同地层下,既有隧道变形规律和控制效果存在差异,且上软下硬复合地层中下穿双线隧道的变形控制分析尚不明确。因此,本研究依托广州地铁 22 号线工程,通过数值模拟探究了硬岩全风化花岗岩地层中新建隧道下穿软岩花岗岩残积层中既有双线隧道时,不同施工参数对既有隧道和地表变形的影响规律及变形控制效果。基于分析结果指导施工,取得了良好的应用效果。

1 工程概况

广州地铁 22 号线采用盾构法下穿越既有地铁 3 号线。既有线隧道底距 22 号线隧道顶 11.0 m, 22 号线隧道埋深 26.4 m, 3 号线隧道埋深 9.1 m。地质情况如图 1 所示,自上而下依次为人工填土、花岗岩残积土层、全风化花岗岩。既有 3 号线穿越花岗岩残积土层,新建 22 号线隧顶及洞身处于全风化花岗岩地层。既有 3 号线所在地层强度

较低,对既有 3 号线变形及地表沉降要求高。

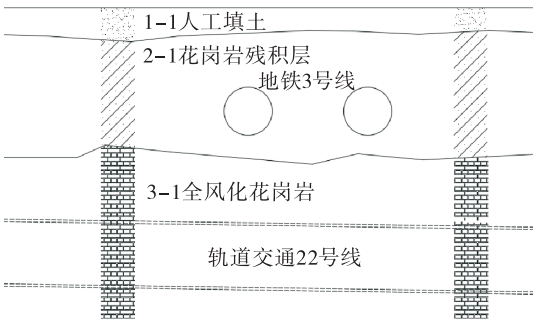


图 1 工程地质图

2 数值模拟分析

2.1 数值模型

为保证新建 22 号线安全下穿既有 3 号线,采用数值模拟方法探究施工参数对既有隧道及地表变形的控制效果,模型如图 2 所示。模型尺寸 80 m×100 m×80.8 m,模型四周边界进行法向约束,底部法向、切向均进行约束,顶部为自由约束。地层和衬砌均采用实体单元,地层服从摩尔库仑本构,衬砌服从弹性本构。既有 3 号线隧道管片外径 6.0 m,每环管片长度 1.5 m,管片厚度 0.3 m;既有 22 号线隧道管片外径 8.5 m,每环管片长度 1.6 m,管片厚度 0.4 m,管片均采用 C50 混凝土。此外,地层参数如表 1 所示。

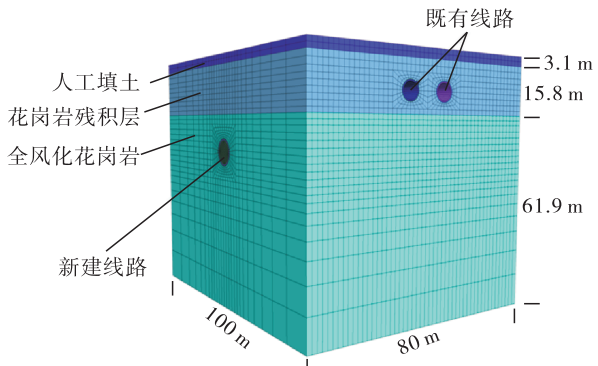


图 2 数值模型

表 1 地层参数

地层类型	厚度/ m	密度/ (kg/m³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/°	弹性模 量/MPa	泊松 比
人工填土	3.1	2 152	26	23.7	45	0.3
花岗岩残积层	15.8	2 337	31	22	97	0.3
全风化花岗岩	—	2 476	33	30	215	0.3

本研究旨在探究施工参数中注浆压力和掌子面支护力(图 3)对既有隧道及地表变形的控制

效果，选取原则分别如式（1）、式（2）所示，设计工况如表 2 所示。

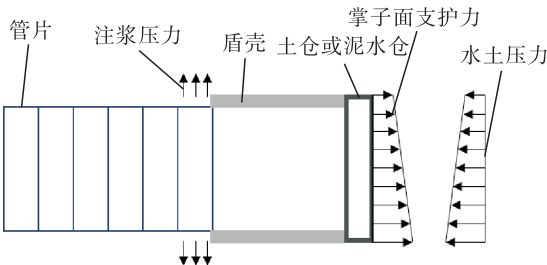


图 3 盾构施工参数示意图

$$P = \lambda_p \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \tag{1}$$

$$F = \lambda_f K \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \tag{2}$$

式中， P 为注浆压力； λ_p 为注浆压力系数； γ_i 为 i 层地层密度； h_i 为第 i 层地层覆土厚度； F 为掌子面支护力； λ_f 为支护力系数； K 为侧压力系数。

表 2 工况设计

参数	工况		
λ_p	1.2	1.0	0.8
λ_f	1.2	1.0	0.8

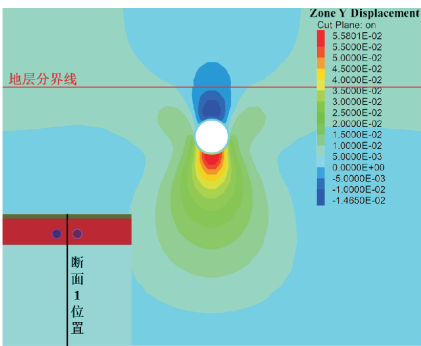
2.2 结果分析

2.2.1 地层变形特征

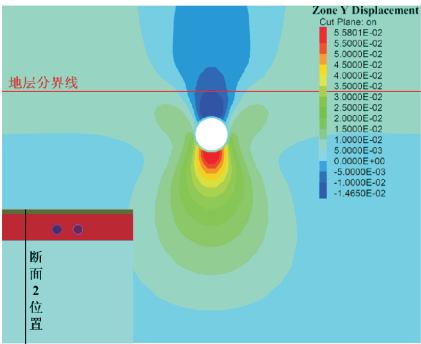
本工程中盾构所穿越全风化花岗岩地层与上覆残积层弹性模量差异显著，会引起地层竖向变形的不连续性，选取新建隧道纵向两处横断面分析上软下硬地层变形特征。断面 1 为既有双线隧道中间位置断面，图 4（a）中地层分界线处存在变形突变，分界线上部变形显著小于下部。断面 2 为远离既有隧道处断面，图 4（b）中地层分界线处同样存在变形突变，但变形连续性好于断面 1。表明新建隧道位于下部硬岩中，既有隧道位于上部软岩中时，地层分界线处存在变形突变，既有隧道的存在会强化变形突变，显著降低既有隧道附近地层变形。

2.2.2 注浆压力影响

工程中，掌子面支护力 λ_f 一般为 1.0。因此取 $\lambda_f = 1.0$ 时，探究不同注浆压力下既有隧道变形规律，如图 5 所示。由图中可知，研究工况中既有隧道最大变形均为沉降。沿既有隧道纵向，沉降变化曲线呈现单峰形式，最大沉降位于新建隧道顶部对应位置。不同注浆压力下，既有隧道最大沉降分别为 1.13 mm、2.71 mm、4.89 mm。随



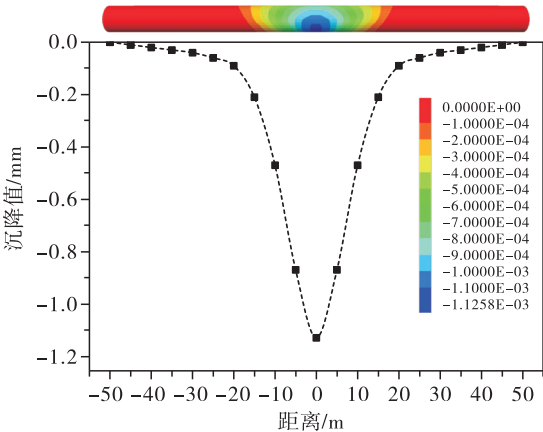
（a）断面 1



（b）断面 2

图 4 地层变形特征

着注浆压力减小，既有隧道沉降显著增大，既有隧道最大沉降增大幅度分别为 1.58 mm 和 2.18 mm。这意味随着注浆压力减小，既有隧道沉降增大幅度逐渐增加，注浆压力对既有隧道变形的影响程度逐渐增大。不同注浆压力下，新建隧道对既有隧道纵向变形的影响范围分别约为 20 m、25 m、32 m，即约为 2.35 D 、2.94 D 、3.74 D 的影响范围， D 为新建隧道洞径。这表明注浆压力越小，新建隧道对既有隧道纵向变形的影响范围越广。由此可知，增大注浆压力可减小新建隧道沉降以及新建隧道沉降范围。



（a）1.2 λ_p

图 5 不同注浆压力下既有隧道变形规律（ $\lambda_f = 1.0$ ）

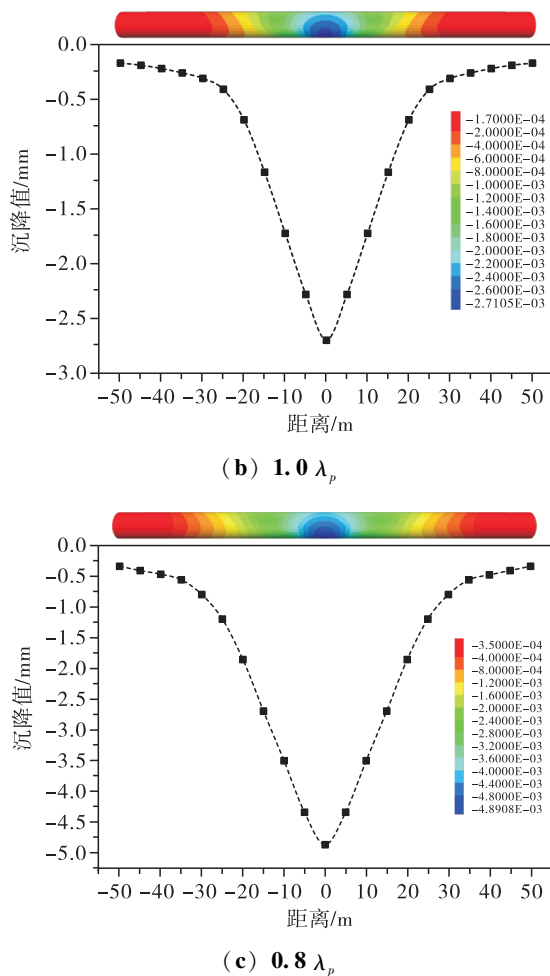


图5 不同注浆压力下既有隧道变形规律
($\lambda_f = 1.0$) (续)

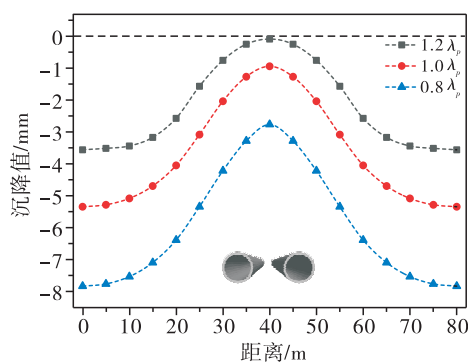


图6 不同注浆压力下地表纵向变形规律 ($\lambda_f = 1.0$)

图6为不同注浆压力下地表纵向变形规律。由图可知,研究工况中地表变形均为沉降。沿新建隧道纵向,地表沉降变化曲线呈现单谷形式,最小沉降位于既有双线隧道中间位置。这意味着既有隧道对地层有着加固作用,可限制地表沉降。双线隧道距离较近时,双线加固区域影响范围重叠,导致地表沉降呈现单谷形式,受影响最大位置位于既有双线中部。对于不同注浆压力,地表最小沉降分别为0.07 mm、0.93 mm、

2.76 mm。随着注浆压力减小,地表最小沉降增幅分别为0.86 mm、1.83 mm。这意味着随着注浆压力减小,地表沉降逐渐增大,地表沉降增大幅度也逐渐增加。不同注浆压力下,既有双线隧道对纵向地表沉降的减小范围分别约为24 m、27 m、30 m。这表明注浆压力越小,既有隧道对地表纵向变形的减小范围越广。由此可知,增大注浆压力可显著减小地表沉降,并减小既有隧道对地表纵向变形的影响范围。

2.2.3 掌子面支护力影响

$\lambda_p = 1.2$ 时,既有隧道和地表变形最小。因此取 $\lambda_p = 1.2$ 时,探究不同掌子面支护力下既有隧道变形规律。由图7可知,研究工况中既有隧道最大变形均为沉降。沿既有隧道纵向,沉降变化曲线呈现单峰形式,最大沉降位于新建隧道顶部对应位置。不同掌子面支护力下,既有隧道最大沉降分别为1.02 mm、1.13 mm、1.31 mm。随着掌子面支护力减小,既有隧道沉降略有增大,既有隧道最大沉降增大幅度分别为0.09 mm和0.18 mm。这意味着随着掌子面支护力减小,既有隧道沉降增大幅度逐渐增加,掌子面支护力对既有隧道变形的影响程度逐渐增大。不同掌子面支护力下,新建隧道对既有隧道纵向变形的影响范围均约为25 m,即约为2.94 D的影响范围。这表明不同掌子面支护力下,新建隧道对既有隧道纵向变形的影响范围的影响不显著。总体而言,掌子面支护力减小会增大既有隧道沉降,但影响程度较小。

图8为不同掌子面支护力下地表纵向变形规律。由图可知,研究工况中地表变形既有沉降,也有隆起,最小沉降或最大隆起位于既有双线隧

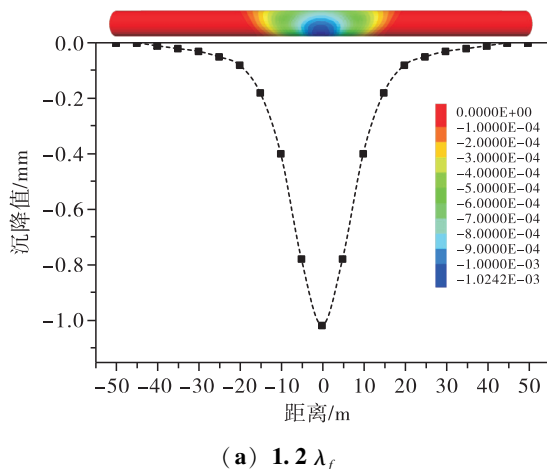


图7 不同掌子面支护力下既有隧道变形规律 ($\lambda_p = 1.2$)

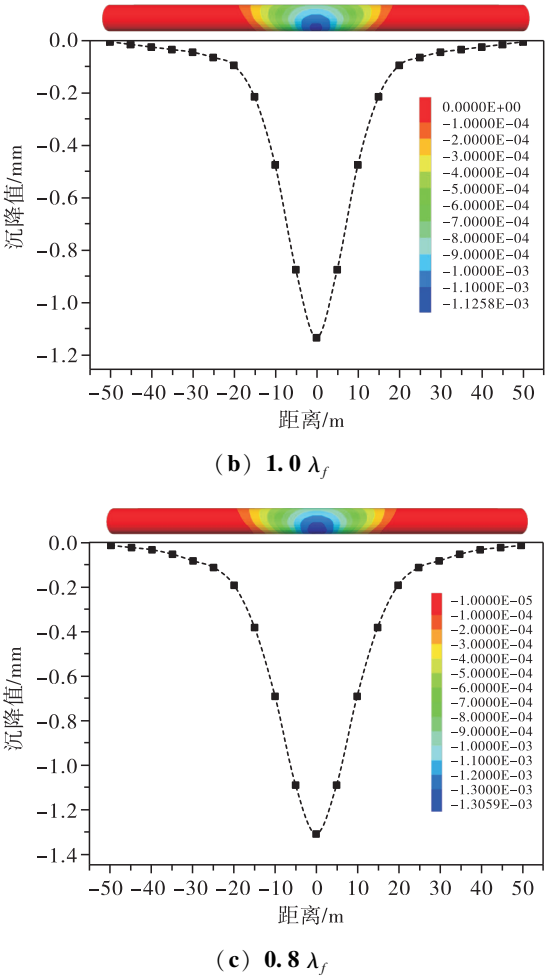


图 7 不同掌子面支护力下既有隧道变形规律 ($\lambda_p = 1.2$) (续)

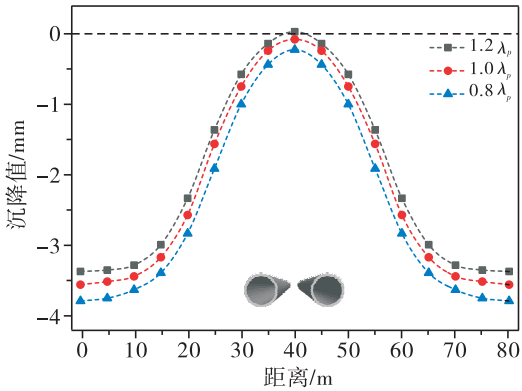


图 8 不同掌子面支护力下地表纵向变形规律 ($\lambda_p = 1.2$)

道中间位置。对于不同掌子面支护力， $\lambda_f = 1.2$ 时，既有双线隧道中间位置出现隆起，约为 0.04 mm， λ_f 为 1.0 和 0.8 时地表最小沉降分别为 0.07 m、0.22 mm。随着注浆压力减小，双线隧道中间位置地表变形由隆起变为沉降，且沉降越来越大，其余位置地表沉降增大幅度随着注浆压力减小也有所增加。不同掌子面支护力下，既

有双线隧道对纵向地表沉降的减小范围均约为 27 m。这表明不同掌子面支护力下，既有隧道对地表纵向变形的影响范围的影响不显著。由此可知，增大掌子面支护力可减小地表沉降，但影响程度有限。此外，掌子面支护力大于 1.2 倍侧压力时，会引起既有双线隧道中部地表隆起。

3 实例应用

由数值模拟结果可知，增大注浆压力和掌子面支护力均会减小既有隧道和地表的沉降。由规律可推知，注浆压力和掌子面支护力较大时，会引起既有隧道和地表的隆起，且呈正相关。因此，根据数值模拟结果，采用 $\lambda_p = 1.2$ 、 $\lambda_f = 1.0$ 时作为工程实际应用参数应用依据。具体而言，在实际工程中控制注浆压力在 600 kPa 左右，掌子面支护力控制在 240 kPa 左右，并对既有隧道和地表变形进行监测。现场监测测点布置如图 9 所示，既有隧道和地表变形测点布置间距均为 5 m。由于既有隧道在运营期间，采用静力水准仪进行监测，可避免对运行列车的影响，既有隧道变形测点布置在道床上。地表变形采用全站仪监测，测点布置于既有隧道轴线对应地表。

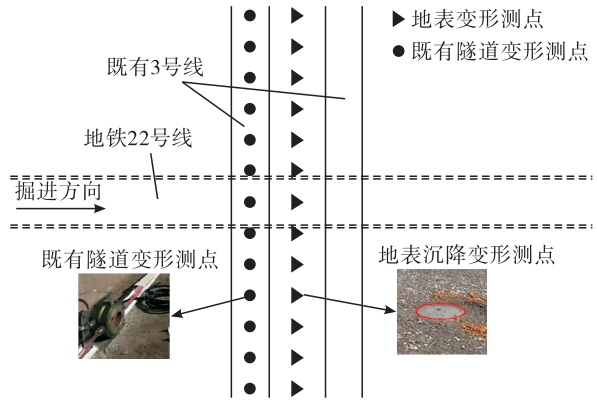


图 9 现场监测测点布置

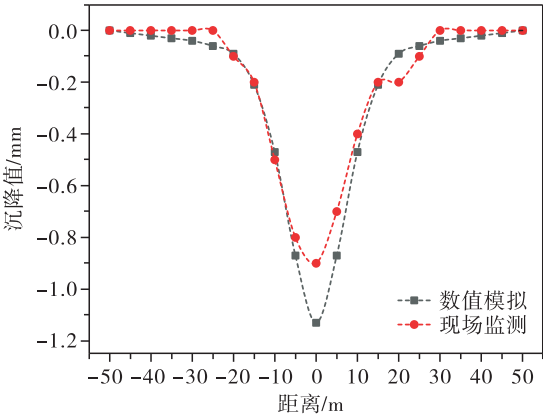


图 10 既有隧道变形数据对比

图10为数值模拟和现场监测的既有隧道变形数据对比。由图可以看出,数值模拟和现场监测的既有隧道变形规律基本一致,呈单峰形式,最大沉降位于新建隧道顶部所在位置,为0.9 mm。整体而言,现场监测结果略小于数值模拟结果,但整体结果相近。隧道顶部和右侧所在位置数值模拟和现场监测结果差异较大,误差在20%左右,其余位置误差均在可接受范围内。

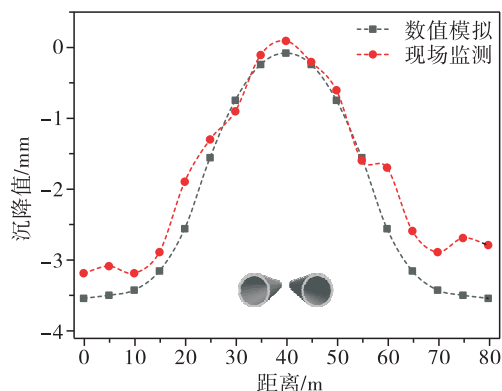


图11 地表变形数据对比

图11为数值模拟和现场监测的地表变形数据对比。由图可知,数值模拟和现场监测的地表变形规律基本一致。双线隧道中间位置数值模拟结果为沉降,数值为0.07 mm;现场结果为隆起,数值为0.1 mm。二者规律虽有差异,但变形值均较小,在数值上差异不大。整体而言,现场监测结果略小于数值模拟结果,但整体基本一致。综合而言,基于数值模拟结果作为注浆压力和掌子面支护力选用依据,在实际工程中取得了良好的应用效果,既有双线隧道和地表变形均得到了有效控制。

4 结论

(1) 增大注浆压力和掌子面支护力可显著减小既有隧道和地表沉降,但掌子面支护力大于1.2倍侧压力时,既有双线隧道中部地表隆起。

(2) 相对于注浆压力,掌子面支护力对既有

隧道和地表变形影响较小,施工中宜以注浆压力作为主要变形控制参数。

(3) 既有隧道对地层有加固效果,可减小新建隧道引起的地表变形,地表变形由既有双线隧道中部向两侧逐渐减小。

(4) 基于数值模拟结果作为注浆压力和掌子面支护力选用依据,在工程中取得了良好的变形控制效果。

参考文献:

- [1] 王坚. 常州地铁2号线盾构下穿既有隧道工程的影响研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2019.
- [2] 刘旭全,刘惊东,宋领弟. 黄土地层盾构下穿既有地铁隧道施工参数及变形控制试验研究[J]. 现代城市轨道交通,2020(7):56-61.
- [3] 杨荟斯,刘涛,缪红彬,等. 盾构隧道近距离下穿对既有运营隧道影响[J]. 大连理工大学学报,2022,62(3):263-271.
- [4] 于群. 盾构隧道近距离下穿既有隧道影响规律的研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [5] 来弘鹏,王腾腾,张林杰,等. 考虑盾壳与土体摩擦力的盾构下穿既有地铁隧道施工控制研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(5):729-739.
- [6] 田金科. 盾构下穿既有隧道影响与控制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
- [7] 罗文亮. 无地面监测条件下富水软弱地层中盾构下穿既有运营隧道变形控制[J]. 施工技术,2017,46(7):136-137.
- [8] 胡秋斌. 双线盾构隧道下穿对既有暗挖大断面隧道影响的数值分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(1):84-92.
- [9] 崔玉龙. 砂土地层盾构隧道超近距离下穿既有隧道变形控制技术研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(3):123-129,135.
- [10] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(4):194-202.
- [11] 金大龙. 盾构隧道群下穿既有地铁运营隧道变形机理及控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.