

多线叠交盾构下穿既有隧道数值模拟分析

王磊¹, 刘伟萍², 郝昕驰¹

(1. 陕西诚信电力工程监理有限责任公司, 陕西 西安 710065;

2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对西安地铁15号线某盾构区间隧道近接正交下穿既有地铁2号线区间隧道施工过程中的重难点问题, 采用三维非线性有限元分析方法研究四线叠交的复杂工况, 考虑盾构不同注浆压力和土仓压力作用下新建隧道的施工对既有隧道变形影响及地表响应规律, 对叠交段采取的袖阀管预注浆加固效果进行验证。研究表明: 距既有隧道中心线2.0~1.6和1.5~3.0倍洞径范围内, 隧道沉降量均随注浆压力和土仓压力增大而减小; 新建隧道的先左后右顺序施工会造成既有隧道结构产生二次沉降; 叠交段地层预加固可使既有隧道和地表沉降最大值分别减小为未加固时的75%和50%, 隧道结构变形趋势由未加固时的“W”形变为加固后的“V”形, 且沉降量最大位置也发生改变。研究成果可为多线叠交下穿工程的设计和施工提供借鉴。

关键词: 多线叠交隧道; 地层预加固; 数值模拟; 土仓压力; 注浆压力

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)03—0058—07

Numerical Simulation of Multi-line Overlapping Shield Tunneling Under Existing Tunnel

WANG Lei¹, LIU Weiping², HAO Xinchu¹

(1. Shaanxi Chengxin Electric Power Engineering Supervision Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: In view of the major difficulties in the construction of a shield tunnel of Xi'an Metro Line 15 close to orthogonal underpass and existing Metro Line 2 section tunnel, the three-dimensional nonlinear finite element analysis method is used to analyze the complex working conditions of four-line overlapping. Considering the influence of the construction of a new tunnel on the deformation of the existing tunnel and the surface response law under the action of different shield grouting pressures and soil pressure, the reinforcement effect of sleeve valve pipe pre-grouting in overlapping sections was verified. The results show that the tunnel settlement decreases with the increase of grouting pressure and soil pressure within the range of 2.0~1.6 and 1.5~3.0 times of tunnel diameter from the existing tunnel center line. The sequential construction of new tunnels from left to right will cause secondary settlement of existing tunnel structures. The maximum settlement of the existing tunnel and the ground surface can be reduced to 75% and 50% of that without reinforcement, respectively, and the deformation trend of the tunnel structure changes from "W" deformation without reinforcement to "V" shape after reinforcement, and the position of the maximum settlement also changes. The research results can provide reference and guidance for the design and construction of multi-line overlapping underpass engineering.

Keywords: multi-line overlapping tunnel; formation pre-reinforcement; numerical simulation; earth bin pressure; grouting pressure

近年来,随着地下交通体系不断完善,多线叠交隧道下穿施工情况屡见不鲜,致使盾构施工的相互影响问题日益突出^[1-5]。盾构下穿施工将对地层造成二次扰动,所产生的荷载增量会引起上部既有隧道结构的附加变形甚至会影响既有隧道的安全运营,同时由于上部既有隧道结构刚度的限制,也会对地表的变形规律产生影响。

针对盾构下穿施工存在的问题,国内外学者通过理论计算、数值模拟、模型试验等方法取得了许多建设性的成果。甘晓露等^[6]采用 Pasternak 弹性地基梁模型和 Loganathan-Polous 解,提出双线隧道下穿作用下既有隧道纵向变形的简化计算方法,并利用工程实测数据进行对比分析,验证了方法的有效性;汪洋等^[7]采用相似模型试验和三维有限元方法对新建盾构隧道正交下穿施工所引起上部既有隧道的变形和附加内力进行分析,提出通过减小新建隧道前行顶推力来降低既有隧道变形及附加应力;张海波等^[8]利用三维有限元模拟的方法得出叠交施工状态下,隧道间的相对位置以及相对距离决定了新建隧道对老隧道的影响程度;Chehade 等^[9]建立有限元模型分析了双线隧道不同空间位置形式下的相互影响规律,同时考虑了施工先后顺序的影响。

可以看出,目前对于多条叠交隧道近接施工的参数控制以及加固措施的研究相对较少,因此本文基于西安地铁 15 号线某盾构区间隧道近接正交下穿既有地铁 2 号线盾构区间为背景,利用三维非线性有限元软件 ABAQUS 构建新建隧道结构-岩土体-既有隧道结构一体化三维模型,动态模拟新建盾构隧道施工过程,对比不同注浆压力和土仓压力条件,选取最优施工参数,分析既有隧道衬砌变形及地表响应规律,并对既有隧道底部一定范围内的岩土体的预注浆加固效果进行验证,得出一些有益结论,可为多线超近距盾构的安全施工提供参考。

1 工程概况

西安地铁 15 号线一期工程某盾构区间隧道近距离下穿既有地铁 2 号线盾构区间,工程概况如图 1 所示。地铁 2 号线区间隧道与新建的 15 号线区间隧道结构最小净距为 2.2 m,15 号线左右线隧道净距为 12 m。2 号线隧道管片外径为 6 m,内径为 5.4 m,混凝土强度等级为 C50,管片环宽为 1.5 m,厚度为 0.3 m,隧道埋深为 12 m。15 号线隧道管片外径为 6.2 m,内径为 5.5 m,管片采用钢筋混凝土预制而成,混凝土强度等级为 C50,每环管片宽度为 1.5 m,厚度为 0.35 m。地下空间下穿工程的控制可以从既有结构强化、地层介质强化、支护结构强化和动态管控强化四个方面入手^[10],本文采用地层介质强化方法,文献[11]已验证加固新建隧道地层远比加固既有隧道地层所取得的加固效果要好,在下穿之前采用车站端头内超前袖阀管注浆辅助施工,水平注 1:1 水泥水玻璃超前加固地层,如图 1 所示,加固 15 号线区间拱顶 180° 范围,加固半径为 2.2 m,并且沿着 15 号线纵向方向,加固区外扩 2 号线隧道结构边缘 8 m 范围。天然地基土层及加固区地层的基本物理力学参数见表 1。

表 1 地层基本物理力学参数

名称	厚度 /m	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	泊松比
①素填土	1.2	1660	5.6	15	15	0.38
②黄土状土	2.8	1850	11.2	26	17	0.35
③中砂	5.0	2040	25.0	0	34	0.29
④粉质黏土	19.0	2040	21.5	33	22	0.31
⑤中砂	2.0	2115	45.3	0	35	0.26
⑥粉质黏土	20.0	2090	26.4	37	24	0.29
⑦超前加固区	2.2	2250	150.0	66	27	0.25

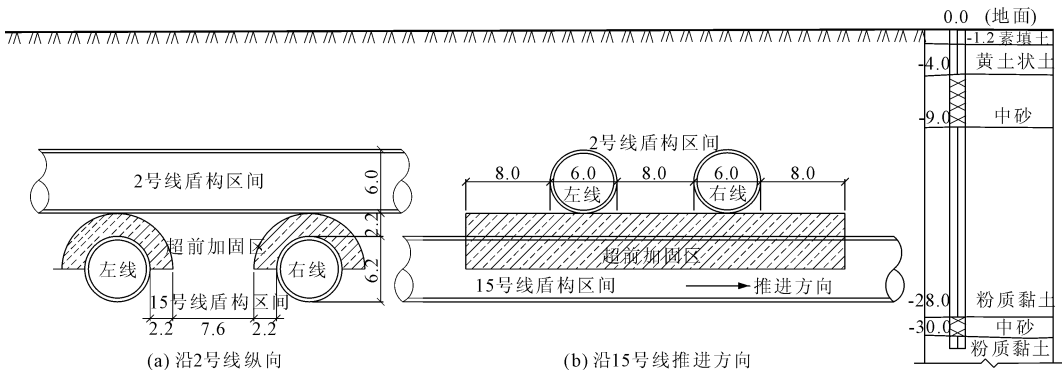


图 1 多线叠交隧道及加固区示意图(单位:m)

2 模型建立及盾构施工模拟

2.1 有限元计算模型

为减小边界效应对计算结果的影响,模型边界至隧道外缘大于 4 倍洞径即可获得满意的计算结果^[12],最终建立三维有限元计算模型尺寸为 72 m × 72 m × 50 m,即沿着 2 号线纵向和 15 号线推进方向均取 72 m,土层划分为 6 层,总厚度取 50 m,三维有限元计算模型如图 2 所示。模型上表面为地面,设为自由表面,并简化为水平面,两侧边界限制各自所在方向上的位移,底面限制水平及竖直方向上的位移。

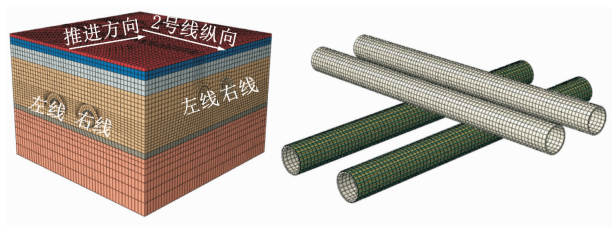


图 2 三维有限元计算模型

土体为弹塑性材料,采用 Mohr-Coulomb 本构模型;盾壳、管片、注浆层均视为弹性材料,采用线弹性模型。土体、盾壳、衬砌和注浆层均采用 8 节点实体单元进行模拟。受土体渗透性,注浆压力等影响,壁后注浆层的厚度及注浆的密实度很难量化,假定注浆层为一均质等厚环,选取不同浆液状态对应的两个典型时间节点,即壁厚注浆初期的液态阶段和经过 24 h (设置该时间段开挖 4 环)后短期固化阶段,以模拟浆液的硬化过程,其各阶段对应的参数见表 2^[13]。

表 2 材料参数				
名称	厚度/mm	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
注浆层(液)	140	2100	0.9	0.38
注浆层(固)	140	2100	4.0	0.35
盾壳	100	7800	210000.0	0.25
衬砌(折减)	350	2500	29300.0	0.20

2.2 盾构施工过程模拟

盾构隧道施工过程主要分为盾构机推进掌子面开挖、盾尾衬砌拼装、盾尾空隙注浆填充三个步骤。模拟盾构隧道开挖一般采用刚度迁移法^[14],即通过改变单元材料的方法来实现盾构的推进。在隧道位置预设盾构机外壳单元、注浆层单元和衬砌单元,运用“生死单元”功能来实现单元刚度的迁移,保证盾构前行的同时,施加相应位置的土仓压力及注浆压

力。鉴于衬砌采取横纵向螺栓拼接而成,建模时将其视为均值体,需采用刚度折减法来考虑管片接头对整体结构刚度的影响,取刚度折减系数为 0.85^[15],衬砌结构参数见表 2。

新建隧道采取左右线先后开挖顺序进行施工,如图 3 所示,第 1~4 步和第 17~20 步为非叠交段,推进长度为 4.5 m/步(3 环),第 5~16 步为叠交段,推进长度为 3 m/步(2 环)。如图 4 所示,以第 $n-3$ 推进步为研究对象,每个推进步需要模拟的内容包括:①移除第 n 步隧道区域的土体并施加盾壳单元;②施加第 n 步位置掌子面压力;③移除第 $n-3$ 步位置的盾壳单元;④对第 $n-3$ 步位置的围岩施加注浆压力;⑤添加第 $n-3$ 步位置的注浆层单元和衬砌单元;⑥第 $n-3$ 步位置注浆层单元处于注浆初期尚未硬化,弹性模量设置为 0.9 MPa;⑦第 $n-6$ 步位置注浆层单元短期固化,弹性模量增大到 4 MPa。

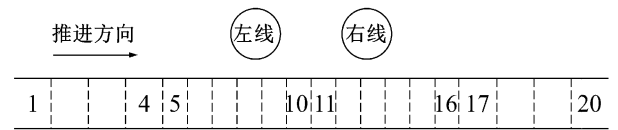


图 3 15 号线盾构推进步划分示意图

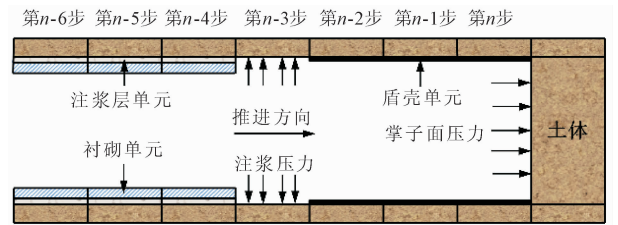


图 4 盾构推进过程示意图

2.3 盾构施工土仓压力和注浆压力的选定

盾构施工的关键因素在于降低土体开挖后的地层损失以及合理控制盾构推进时的土仓压力值,因此土仓压力和注浆压力是影响盾构掘进施工的重要参数^[16-17]。对于土压平衡盾构,掌子面前方的土压和切削下来的土体进入压力仓形成的土仓压力保持平衡时,才能实现盾构的正常掘进^[18]。掌子面前方的理论土压随深度成梯形荷载分布,同时理想状态下的土仓压力也应和土压的分布形式相同,为简化模拟,将土仓压力的取值点设为开挖面中心位置。土仓压力值 σ_t 最小值取决于主动土压力, σ_t 最大值取决于被动土压力。

其中,主动土压力和被动土压力可分别表示为:

$$\sigma_a = k_a \sum_{i=1}^n \gamma_i z_i - 2c \sqrt{k_a}$$

$$\sigma_p = k_p \sum_{i=1}^n \gamma_i z_i + 2c \sqrt{k_p}$$

式中: $k_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$; $k_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$; γ_i 为第*i*层土的重度; z_i 为第*i*层土的厚度; c 为黏聚力。

盾构推进时要严格控制压力仓中的土仓压力,若土仓压力不足且低于掌子面上的土压,将会导致掌子面上的土压由静止土压力状态转变为主动土压力状态,此时盾构机掌子面前方顶部的土体处于卸荷状态且具有向下滑动的趋势,从而引起地表沉降,如图5(a)所示。若土仓压力过大且高于掌子面上的土压,将会导致掌子面上的土压由静止土压力状态转变为被动土压力状态,此时盾构机掌子面前方顶部的土体处于挤压状态且具有向上滑动的趋势,从而引起地表隆起,如图5(b)所示。因此,考虑减小地表沉降以及降低盾构推进对上部既有隧道的影响,合理的土仓压力取值范围应介于主动土压力和被动土压力之间,即 $\sigma_a \leq \sigma_t \leq \sigma_p$ 。

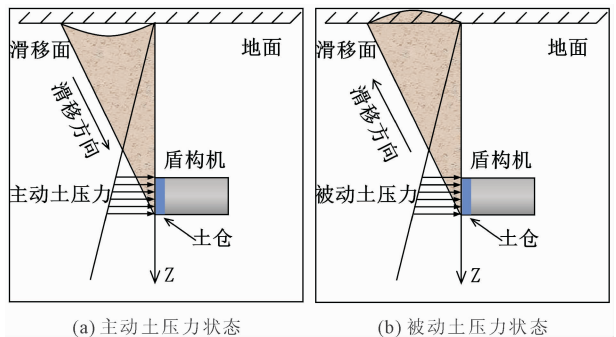


图5 掌子面前方极限土压力状态

根据以往盾构施工经验,注浆压力的取值应综合考虑岩土体的性质、隧道的埋深以及开挖面的大小等因素,施工经验^[19]及文献[20]研究表明:注浆压力取值范围区间一般在0.2 MPa~0.4 MPa,注浆压力不足易引起顶层损失过大,进而导致地表沉降过大,当注浆压力达到0.4 MPa~0.6 MPa,存在混凝土管片开裂或管片间的连接螺栓被剪断的风险。为研究盾构下穿施工土仓压力和注浆压力对既有隧道结构影响及地表响应问题,本文对5种下穿施工工况进行模拟计算,如表3所示。

表3 模拟工况汇总表

工况编号	1	2	3	4	5
土仓压力/MPa	0.25	0.30	0.35	0.35	0.35
注浆压力/MPa	0.40	0.40	0.40	0.30	0.20

3 有限元计算结果分析

3.1 土仓压力对既有隧道变形的影响

工况1—工况3在0.4 MPa恒定注浆压力下,考虑不同土仓压力,既有隧道沉降量随着新建盾构隧道推进步数的变化如图6所示。由图6(a)和图6(b)可知,新建盾构隧道左线推进过程,土仓压力对既有左线和右线隧道沉降影响的推进步分别集中在第5~11步和第8~15步,即在距既有隧道中心线约2.0倍~1.6倍洞径范围内,在此范围内既有隧道的沉降量随着土仓压力的增大而减小,因此该范围内应作为土仓压力重点控制区域,此后既有左线和右线隧道最大沉降量分别稳定在10.3 mm和11.6 mm(对应工况3)。新建右线隧道的施工造成既有左线和右线隧道的沉降量进一步增大,在工况3下,最大沉降量分别增加了2.1 mm和1.9 mm。

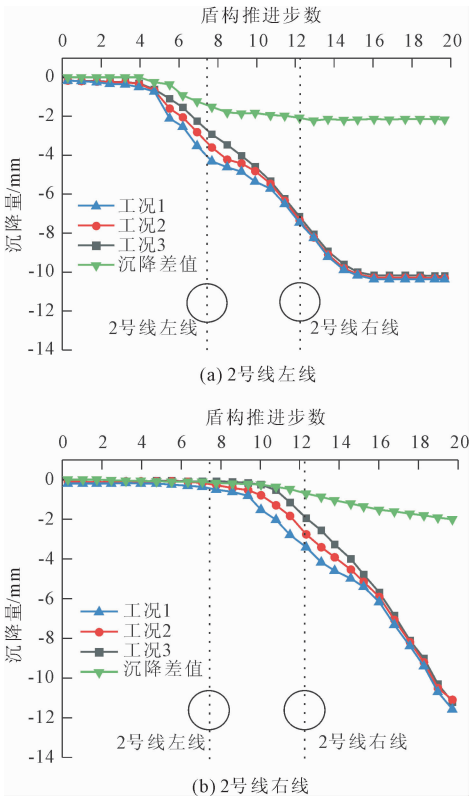


图6 既有隧道的沉降随新建隧道推进步的变化

3.2 注浆压力对既有隧道变形的影响

工况3—工况5考虑不同注浆压力条件,既有隧道的沉降量随着新建盾构隧道推进步数的变化如图7所示。综合图7(a)和图7(b)表明新建盾构隧道左线推进到第5步和第9步,注浆压力即分别对既有左线隧道和右线隧道产生影响,且沉降量随着注浆压力的减小而增大。盾构推进到第13步和第

18 步,既有左线隧道和右线隧道的沉降量均趋于稳定。表明盾构推进到接近既有隧道约 1.5 倍洞径,远离其 3 倍洞径的范围内,是注浆压力主要控制区域。新建右线隧道推进结束,在工况 3 下,既有左线和右线隧道沉降量差值分别为 2.9 mm 和 2.3 mm,故新建盾构隧道右线的施工会造成既有左线隧道产生二次沉降。

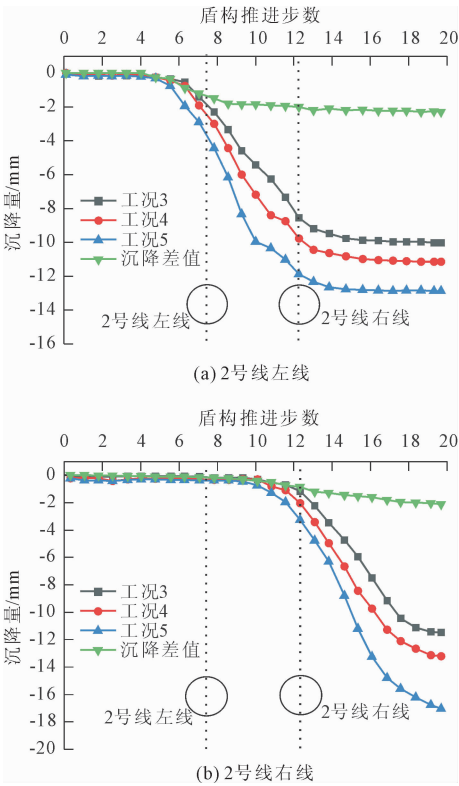


图 7 既有隧道的沉降随新建隧道推进的变化

3.3 新建隧道开挖对既有隧道及地表沉降影响

15 号线盾构隧道在工况 3 条件下穿完成,既有 2 号线隧道结构纵向变形曲线如图 8 所示,隧道整体纵向变形云图见图 9(此云图所取的结构变形放大系数为 1 000)。可以看出下穿施工造成既有隧道结构产生不均匀沉降变形,15 号线采取先左线后右线施工顺序,因此上方既有 2 号线左右线隧道结构均产生“W”形变形趋势。既有隧道沉降最大值均出现在新建隧道中心线上方附近,且由于左线隧道先开挖,已对既有隧道结构产生扰动,右线隧道的施工相当于对既有隧道产生二次扰动,所以既有隧道的沉降最大位置出现在新建隧道右线施工结束后,其中既有左线隧道沉降量最大值为 12.4 mm,右线隧道沉降量最大值为 13.5 mm。新建隧道下穿施工先穿越既有左线隧道,然后再穿越右线隧道,且右线隧道的沉降量值略大于左线隧道沉降量值,这表

明下穿既有左线隧道过程中已对其周围地层产生扰动,从而对后续的既有右线隧道的沉降产生间接的影响。

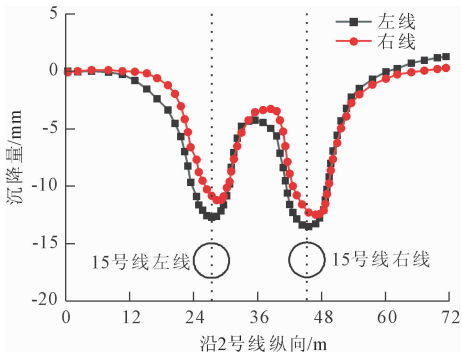


图 8 下穿施工完成既有隧道纵向沉降曲线



图 9 下穿施工完成既有隧道纵向变形云图

下穿施工完成,沉降计算云图如图 10 所示,提取既有隧道左右线纵向拱顶上方地表沉降曲线如图 11 所示(沉降测线见图 10),随着新建 15 号线盾构隧道的推进,既有 2 号线隧道产生沉降的同时,地表也会产生沉降响应。新建隧道采取先左后右的顺序施工,且每条新建隧道的开挖都会对地表产生沉降槽,由于 15 号线左右线隧道净距为 12 m,两条隧道中间夹土层均受各自施工扰动影响,致使地表沉降槽呈现整体的“U”形分布特点,且沉降最大值在两条新建隧道的中间位置附近。既有左线隧道和右线隧道拱顶上方地层沉降最大值分别为 4.4 mm 和 4.6 mm,这表明,下穿施工的先后顺序会影响平行测线的沉降值,但不会改变整体的地表沉降变形趋势。

3.4 加固效果验算

数值模拟对应的地层超前加固区的计算模型如图 12 所示,由表 4 可以看出,新建隧道下穿之前不进行地层加固,既有右线隧道最大沉降值达到了 13.5 mm,地层加固后沉降值明显减小,最大沉降量为 3.3 mm;且地层加固对既有隧道产生的改善效果优于地表沉降,地层加固后地表最大沉降量减小了 2.2 mm。预加固后新建隧道施工对既有隧道整体

结构和既有隧道纵向地表沉降的影响曲线如图 13 和图 14 所示,可以看出地层的加固改变了既有隧道的结构变形趋势,由未加固时的“W”形变为加固后的“V”形,隧道最大变形位置也发生改变,出现在新建隧道左右线中间位置;地表沉降量减小,但整体沉降变形趋势没有发生变化。

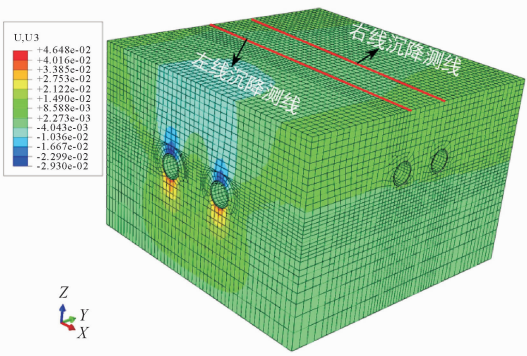


图 10 地表沉降测线示意图

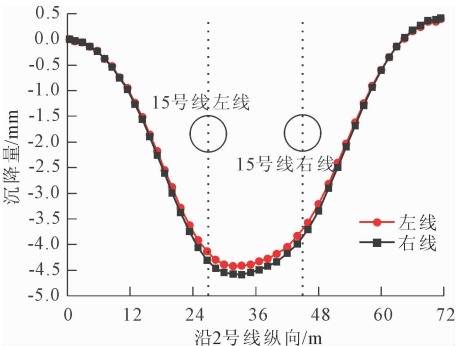


图 11 下穿施工完成地表沉降曲线

有无加固	沉降观测位置			
	2 左隧道	2 右隧道	2 左地表	2 右地表
无加固	12.4	13.5	4.4	4.6
加固后	2.8	3.3	2.3	2.4

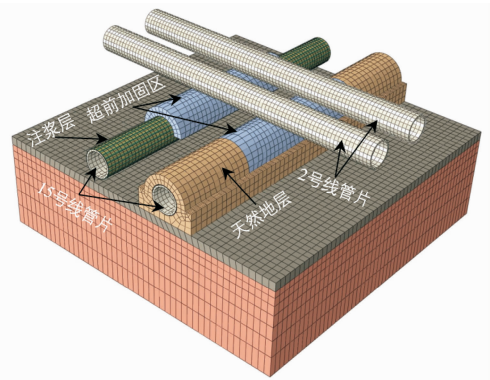


图 12 地层超前加固计算示意图

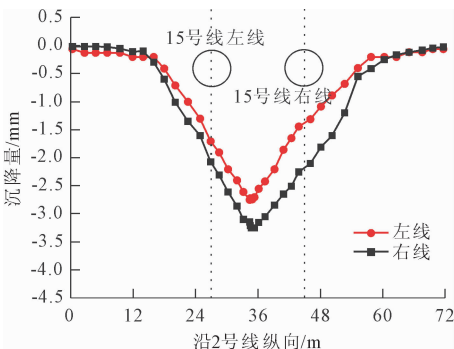


图 13 加固后既有隧道纵向沉降曲线

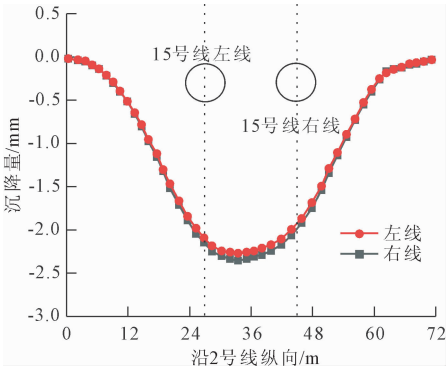


图 14 加固后地表沉降曲线

综合对比地层加固前后曲线图,可以看出对于埋深相对较深的新建隧道的施工,通过改良地层间部分土体的性质,对于减小地表沉降所取得的效果不是很显著,但下穿施工之前,加固新建隧道和既有隧道之间的地层,可以有效减小施工扰动带给既有隧道结构产生的影响。地层的加固范围会影响既有隧道结构的变形趋势,从经济和加固效果角度出发,此类加固新建隧道拱顶一定范围内地层可以取得有效的加固效果。

4 结 论

- (1) 下穿施工盾构推进到距既有隧道中心线 2.0~1.6 倍洞径范围内,既有隧道的沉降量会随着土仓压力的增大而减小,土仓压力的大小对此范围以外的既有隧道的沉降量影响较小;注浆压力主要影响距既有隧道 1.5~3.0 倍洞径范围内的沉降值,且沉降量随着注浆压力的减小而增大。新建盾构隧道的先左后右施工顺序会对既有隧道产生二次沉降。
- (2) 地层未加固条件下新建隧道的施工会导致既有左右线隧道结构均产生“W”形变形趋势,既有隧道沉降最大值均出现在新建隧道中心线上方附近,且既有右线隧道的最大沉降量比左线隧道略大。地层的加固有效减小既有隧道的沉降量,最大沉降

量减小约 75%,且改变了既有隧道的结构变形趋势,由未加固时的“W”形变为加固后的“V”形,隧道最大变形位置也发生改变,出现在新建隧道左右线中间位置。

(3) 地层未加固条件下地表沉降槽呈现整体的“U”形分布特点,且沉降最大值在两条新建隧道的中间位置附近。地层加固后未改变地表沉降槽的变形趋势和沉降最大值所在的位置,与地层未加固对比,加固后地表最大沉降量约降低了 50%。

参考文献:

- [1] Gan Xiaolu, Yu Jianlin, Gong Xiaonan, et al. Characteristics and countermeasures of tunnel heave due to large-diameter shield tunneling underneath[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(1): 04019081.
- [2] 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.
- [3] 陈先国,王显军. 近距离重叠隧道的二维和三维有限元分析[J]. *西南交通大学学报*. 2003,38(6):643-646.
- [4] 赵旭峰,王春苗,孙景林,等. 盾构近接隧道施工力学行为分析[J]. *岩土力学*,2007,28(2):409-414.
- [5] Aygerinos V, Potts D M, Standing J R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels[J]. *Géotechnique*, 2017,67(9):808-822.
- [6] 甘晓露,俞建霖,龚晓南,等. 新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020,39(2):3586-3594.
- [7] 汪 洋,何 川,曾东洋,等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. *铁道学报*,2010,32(2):79-85.
- [8] 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.
- [9] Chehade F H, Shahrou I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2008,23(2):210-214.
- [10] 雷升祥,黄双林. 地下空间下穿建(构)筑物扰动机制与控制技术[J]. *隧道建设(中英文)*,2022,42(1):1-8.
- [11] 方 勇,何 川. 盾构法修建正交下穿地铁隧道对上覆隧道的影响分析[J]. *铁道学报*,2007,29(2):83-88.
- [12] 吕爱钟,蒋斌松,尤春安. 位移反分析有限元网格划分范围的研究[J]. *土木工程学报*,1999,32(1):26-30.
- [13] 高广运,朱林圆,刘 倩,等. 注浆层参数对上海地铁隧道沉降的影响研究[J]. *建筑科学*,2014,30(S2): 211-215.
- [14] 陈卫忠,伍国军,贾善坡. ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [15] 姜忻良,贾 勇,王 涛. 近距离平行隧道施工对老隧道影响的数值模拟[J]. *天津大学学报*,2007,40(7):786-790.
- [16] Leca E, New B. Settlements induced by tunneling in soft ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007,22(2):119-149.
- [17] Cheng Shao, Dong Shenglan. Optimal control of an earth pressure balance shield with tunnel face stability[J]. *Automation in Construction*, 2014,46:22-29.
- [18] 王 非,缪林昌,黎春林. 考虑施工过程的盾构隧道沉降数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013,32(S1):2907-2914.
- [19] 姜忻良,贾 勇,王 涛. 近距离平行隧道施工对老隧道影响的数值模拟[J]. *天津大学学报*,2007,40(7):786-790.
- [20] 尹旅超,朱振宏,李玉珍,等. 日本盾构隧道新技术[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1999.