

TBM 始发下穿市政干道沉降变形规律研究

梁杰¹ 程可缘¹ 陈铁¹ 刘刚¹ 杨任杰¹ 王杰²

1 中国水利水电第七工程局有限公司

2 重庆大学 土木工程学院

DOI:10.32629/etd.v7i8.21644

[摘要] 地层沉降控制是城市地铁TBM隧道下穿市政干道施工中的关键技术问题。现有研究多聚焦于隧道开挖对既有建筑、铁路的影响,针对市政公路的针对性研究相对较少。以重庆轨道交通27号线西永站~磁器口站区间TBM下穿杨双路工程为背景,采用MIDAS-GTSNX有限元软件建立三维地质力学模型,模拟分析TBM施工过程中路表纵横向沉降变形规律,探讨掌子面支护力与盾尾注浆压力对沉降的影响,并结合现场监测数据验证模型合理性。结果表明:除距开挖面2 m近区路面直接沉降外,远区路面均呈现先隆起、后沉降、再趋于稳定的规律;左线先行施工沉降占双线总沉降的84.9%~89.7%。左线施工后横向沉降槽呈“U”型,双线施工后呈“W”型,均符合Peck曲线分布特征。掌子面支护力与盾尾注浆压力均可抑制地表沉降,且存在明显阈值:当两者均取0.18 MPa时,继续增压对沉降控制效果提升显著减弱,且注浆压力过大会增加管片开裂风险。现场监测与数值模拟结果吻合度较高,模拟结果偏安全,满足工程沉降控制预警要求。研究表明,掌子面支护力与盾尾注浆压力均取0.18 MPa较为合理。

[关键词] TBM施工; 市政干道下穿; 路面沉降变形; 数值模拟

中图分类号: TU **文献标识码:** A

Study on Settlement and Deformation Characteristics of Municipal Arterial Road Under-crossed by TBM during Launching

Jie Liang¹ Keyuan Cheng¹ Tie Chen¹ Gang Liu¹ Renjie Yang¹ Jie Wang²

1 Sinohydro Bureau 7 CO., LTD.

2 School of Civil Engineering, Chongqing University

[Abstract] Stratum settlement control is a key technical issue in the construction of urban metro TBM tunnels undercrossing municipal arterial roads. Most existing studies focus on the influence of tunnel excavation on existing buildings and railways, while targeted research on municipal highways is relatively insufficient. Based on the TBM undercrossing project of Yangshuang Road in the section from Xiyong Station to Ciqikou Station of Chongqing Rail Transit Line 27, a three-dimensional geomechanical model is established by using MIDAS-GTSNX finite element software. The longitudinal and transverse settlement and deformation laws of the road surface during TBM construction are simulated and analyzed, the influences of face support pressure and shield tail grouting pressure on settlement are discussed, and the rationality of the model is verified with field monitoring data. The results show that the road surface far from the excavation face experiences heave first, then settlement, and finally stabilizes, except for the direct settlement within 2 m near the excavation face. The settlement caused by the construction of the left tunnel accounts for 84.9%~89.7% of the total settlement of the double-track tunnel. The transverse settlement trough presents a "U" shape after the construction of the left tunnel and a "W" shape after the double-track construction, both of which conform to the Peck curve distribution. The face support pressure and shield tail grouting pressure can both restrain ground settlement with an obvious threshold. When both pressures are set at 0.18 MPa, the improvement effect of further increasing pressure on settlement control weakens significantly, and excessive grouting pressure increases the risk of segment cracking. The field monitoring data are in good agreement with

the numerical simulation results. The simulation results are on the safe side and meet the early warning requirements of engineering settlement control. It is reasonable to set both the face support pressure and shield tail grouting pressure at 0.18 MPa.

[Key words] TBM construction; Municipal trunk road undercrossing; Pavement Settlement and Deformation; Numerical simulation

引言

为缓解日益增加的城市交通压力,地铁建设规模正逐渐扩大。在城市地下交通建设过程中,地铁线路下穿市政干道等既有道路的问题不可避免。隧道施工穿越既有道路时,若地层沉降得不到有效控制,可能造成路面沉陷、坍塌,引发安全事故和交通瘫痪。地层变形是下穿工程中地表道路、构筑物等破坏的直接原因。TBM掘进机以其高效、快速、安全、工作环境优良等优点,成为城市地铁隧道建设中最常用的方法^[1]。

针对地铁隧道开挖的影响,国内外学者开展了大量研究。孙杰等^[2]指出,双线隧道开挖中埋深越浅,建筑物受横向距离较近的隧道开挖影响占比越大;埋深越大,受双隧道叠加影响越大。张兵^[3]提出了适宜的双护盾TBM施工控制参数及掘进参数,有效提高了施工效率。高利宏^[4]结合数值模拟与实测数据,得出了新建左、右线依次穿越过程中既有双线隧道的沉降变形规律。甘晓露等^[5]提出了双线隧道下穿作用下既有隧道纵向变形的简化计算方法,为合理预测施工影响提供了理论依据。李志军等^[6]分析了隧道穿越破碎带时的围岩变形规律,优化了注浆加固方案。郑扬等^[7]研究了双线TBM隧道施工对既有桥梁结构的变形规律。杨芝璐等^[8]分析了超大直径盾构施工引起的既有双线隧道变形规律。高朗等^[9]通过精细化数值仿真揭示了既有营运车站在新建双线隧道施工下的变形规律。刘赞君等^[10]指出,豆砾石回填注浆及软硬岩交界面位置对建筑物沉降具有重要影响。齐勇^[11]通过Peck公式计算轨道沉降,验证了D型便梁加固+洞内注浆措施的有效性。王志超等^[12]分析了盾构穿越过程中有无深孔注浆时钢轨变形与路基沉降规律。徐干成等^[13]对下穿京津城际铁路段进行了三维仿真,提出了铁路横向、纵向及不均匀沉降控制措施。

现有研究多聚焦于地铁隧道开挖对既有建筑、铁路等的影响,对既有公路影响的研究较少。因此,本文以重庆轨道交通27号线工程的第5区间为研究对象,该区间下穿既有道路杨双路,采用MIDAS-GTS NX软件建立三维有限元计算模型,分析地铁隧道开挖对路面沉降的影响,探索路面的横向和纵向变形规律,并分析不同土仓压力和注浆压力下路面沉降的变化,以期为类似工程提供指导和借鉴。

1 工程背景

1.1 工程概况

西永站~磁器口站区间作为重庆轨道交通27号线工程的第5个区间,区间内采用了TBM法、明挖法、矿山法三种隧道开挖工法,其中下穿12国道(杨双路段)区间段采用的开挖工法为TBM法。线路始于中梁山东侧的明挖隧道段,后向东南方向

偏转,在穿越杨双路、原重庆特种钢厂家属区、建设坡社区房屋、东华医院及石井坡变电所等建筑后,线路沿童家桥正街继续向南敷设,与重庆轨道交通1号线石井坡站~磁器口站区间近似平行敷设后进入磁器口站,磁器口站为1号线与27号线换乘站。

隧道下穿采用TBM法施工,此TBM区间段下穿杨双路,与道路轴线呈66°斜交,线路平面图见图1。区间左线长度为1290.580 m(ZD9+990.000~ZD1+243.848),右线长度为1272.3(YD9+971.500~YD1+243.848),区间为两条平行的单洞单线圆形隧道,内径7.7 m,外径8.5 m。该段杨双路为双向6车道,道路路基总宽度约35,其中中间带3+行车道6+人行道2。

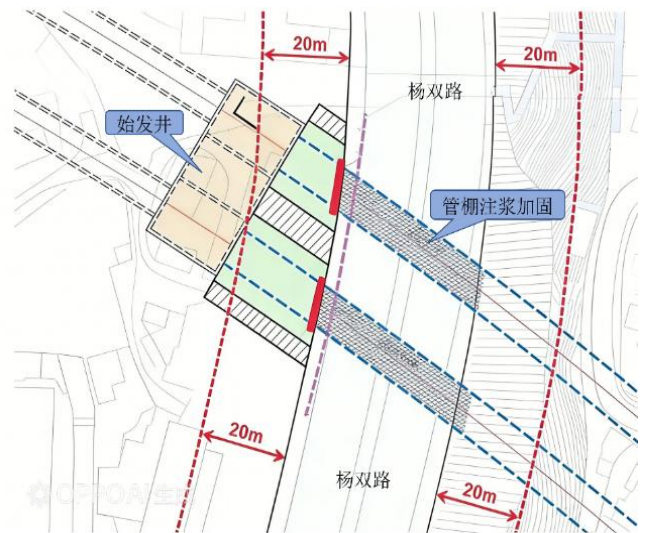


图1 TBM盾构区间下穿杨双路平面示意图

1.2 工程地质

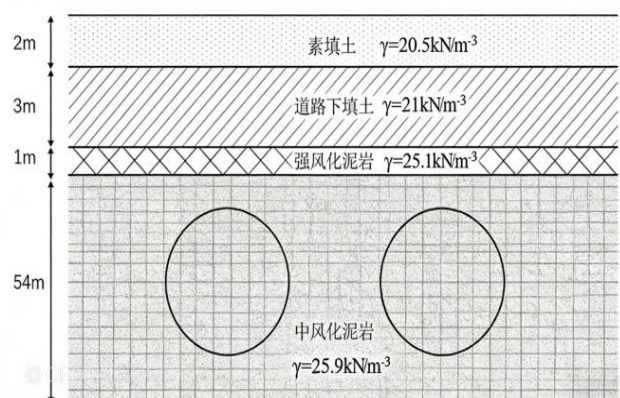


图2 盾构区间地质剖面示意图

本工程在中梁山西翼,构造剥蚀丘陵与低山的渐变带,该段

受人类活动改造强烈,本段大部分已被人工填平,局部存在由挖填形成的边坡,原始地貌绝大部分被改造为居民区和市政道路。线路区地层主要为一套海相与浅海相碳酸岩盐、碎屑岩和内陆相碎屑岩沉积;出露的地层除白垩系、第三系缺失外,自三叠系至第四系均有不同程度的发育。以侏罗系出露厚度最大、分布最广,三叠系次之,第四系零星分布。

盾构区间地层自上而下为素填土、道路下填土、强风化泥岩和中风化泥岩,如图2所示。

2 数值模型及计算参数

2.1 基本假定

(1) 岩土体为均质、各向同性的材料,其受力和变形在弹、塑性范围内变化,衬砌受力和变形在弹性范围内变化;

(2) 不考虑时间效应,盾构推进为空间位移上的变化。

2.2 有限元模型

本文使用Midas /GTS有限元分析软件进行盾构隧道三维数值模型建立,GTS作为岩土和隧道结构分析领域的专用有限元分析软件,其分析和图像后处理功能非常强大^[14]。TBM区间段隧道埋深8 m,两隧道间距6 m,衬砌外径8.5 m,内径7.7 m,由于杨双路道路路基总宽度35 m,且模型左右边界分别距相应侧隧道外侧大于,下边界距隧道外侧大^[15]。因此模型的长、宽、高分别取为54 m、80 m、60 m,其中隧道在垂直方向上向下取43.5 m,向上取到地面。模型中的6个面,只有地面为自由,其余5个面均施加法向约束。三维有限元模型如图3所示。

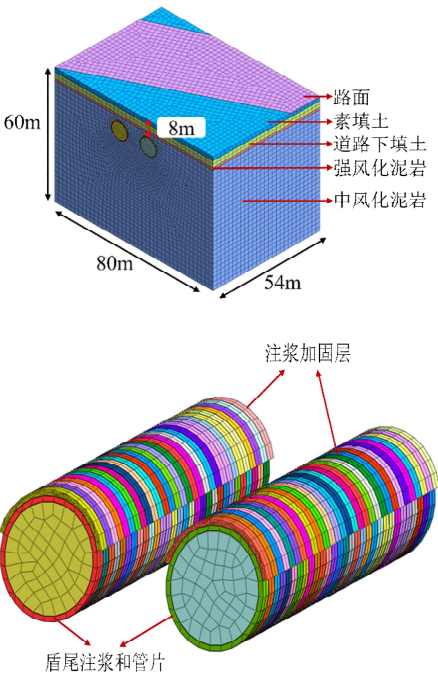


图3 三维有限元数值模型

2.3 参数选取

根据地质勘探报告和数值模拟经验可知,土体共分为4层,从上至下分别为素填土、道路下填土、强风化泥岩和中风化泥

岩,厚度分别为2、3、1、54 m。衬砌管片采用C30混凝土,地层模型选用软件自带的Mohr-Coulomb模型,盾壳、管片衬砌及盾尾注浆均采用弹性模型,由于管片衬砌不是一个天然的整体,而是通过螺栓将单个管片进行连接,考虑到连接后形成的管片整体具有各向同性的性质,故对管片均质化时需要乘以刚度折减系数0.8^[16]。杨双路为二级公路,根据《公路工程技术标准》(JTG1-2014)的相关规定,路面荷载按公路Ⅰ级荷载,荷载标准值为10.5 kN^[17]。模型中所用到的各种材料力学参数见表1。

表1 模型材料参数表

材料性质	弹性模型 E/MPa	泊松比 μ	容重 γ/kNm^3	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$
素填土	0.3	0.1	20.5	0.005	24
道路下填土	0.84	0.15	21	0.006	28
强风化泥岩	500	0.35	25.1	0.2	30
中风化泥岩	1208	0.33	25.9	0.66	34.4
衬砌管片 0	34500	0.2	25		
大管棚	68780	0.3	34.648		
管棚注浆层	1450	0.3	22	200	35

2.4 工况设置

在数值模拟中通过施加垂直于开挖面的力来模拟掌子面支护力,施加的掌子面支护力是在掌子面施加按深度分布的梯形荷载,其数值按静止土压力计算公式^[18]为

$$p=\gamma z$$

式中: p 是静止土压力系数, γ 是土的重度, kN/m^3 ; z 是掌子面岩体深度, m 。为了简化计算,将掌子面的支护力取为盾构机顶部和底部静止土压力的平均值。此次数值模拟分别选取了0. Pa、0. 16 MPa、0. 18 MPa、0. 2 MPa四种不同掌子面支护力来探究掌子面支护力对道路沉降的影响。

在数值模拟过程中通过在盾尾处设置环向的压力来模拟施工过程中的盾尾注浆压力,盾尾注浆能够弥补地层损失,对施工完成后地表沉降起着决定性作用。此次数值模拟分别选取了0. 14 MPa、0. 16 MPa、0. 18 MPa、0. 2 MPa三种不同盾尾注浆压力来探究盾尾注浆压力对道路沉降的影响。

2.5 掘进模拟

TBM盾构机掘进时,首先开挖一个长度为1.8 m的土体隧道,给盾壳单元赋予属性,再在掌子面上加上掘进压力;当盾构机向前推进一个盾体长度(9 m)时,开始钝化掉盾壳属性,给衬砌环赋予管片属性,同时开始添加盾尾注浆;盾构继续向前推进,由于盾尾注浆发挥承载力需要一定时间,故在添加盾尾注浆的下一环将盾尾注浆的属性改为固态注浆材料最终属性;与此同时,

分别在盾壳的管片上施加径向的拉力和压力以模拟盾尾注浆凝固时对盾壳和管片分别产生的向外和向内的挤压。

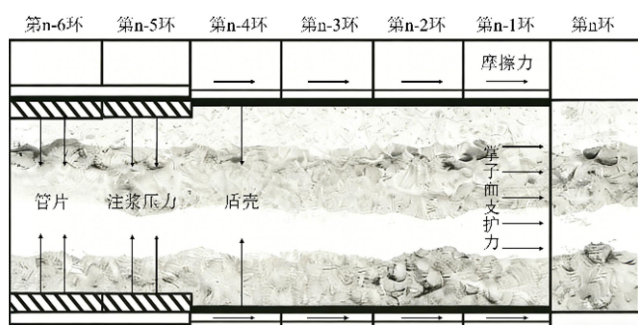


图4 TBM施工过程模拟

2.6 计算监测点布置

为更好地分析隧道盾构模型开挖过程中整个路面变形的发展规律,在纵向方向上分别选取距开挖起点2 m、15 m、30 m、45 m处两隧道中间的位置进行纵向沉降规律分析,在横向方向上选择距开挖点25 m处横截面分析横向沉降规律。

3 计算结果及相关分析

3.1 左线施工过程中路面沉降纵向变形规律

虽然在不同工况下开挖时路面沉降的具体值有所差异,但各种工况下的沉降变形规律是基本一致的,故本文只选择基准组(掌子面支护力0. Pa,盾尾注浆压力0. Pa)进行路面沉降变形规律的分析。图5为左线隧道施工完成后的路面变形规律。左线施工时,距开挖面距离为2 m位置处的路面沉降曲线呈现出刚开始的沉降速度快,随后减小,最后逐渐趋于稳定的规律,其最大沉降出现在第6个开挖阶段,最大值为1.97 mm;其余三条曲线在初始开挖阶段都出现了一定程度的上升,上升到某一值后再以较快的速度呈下降趋势,最后趋于稳定。说明地表在左线开挖过程中的沉降表现为先隆起,后和距开挖面2 m的沉降曲线一样逐渐减小,最后趋于稳定。距开挖面距离为15 m、30 m、45 m位置处的最大隆起分别出现在第6、7、8个开挖阶段,最大隆起值分别为0.46 mm、0.48 mm和0.43 mm;最大沉降出现在第13、14、17个开挖阶段,最大沉降值分别为1.28 mm、1.40 mm和1.29 mm。

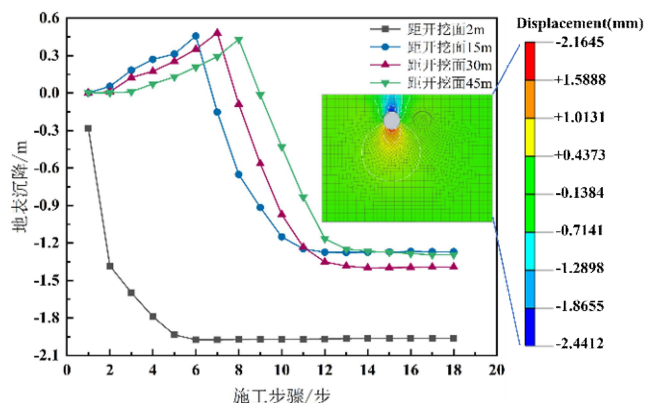


图5 左线隧道施工完成后路面纵向变形

3.2 右线施工过程中路面沉降纵向变形规律

图6为左右线隧道施工完成后路面变形规律。右线施工完成后,距开挖面距离为2 m位置处的路面沉降曲线呈现类似于“抛物线”的规律,其最大沉降出现在第25个开挖阶段,最大值约为3.92 mm;距开挖面距离为15 m、30 m、45 m位置处的沉降曲线仍表现为先隆起,后逐渐减小,最后趋于稳定,最大隆起分别出现在第24、26、24阶段,最大隆起值分别为0.4 mm、0.48 mm、0.39 mm;距开挖面距离为15 m、30 m、45 m处路面最大沉降分别出现在第29、30、31个开挖阶段,最大沉降值分别为1.48 mm、1.56 mm、1.52 mm。

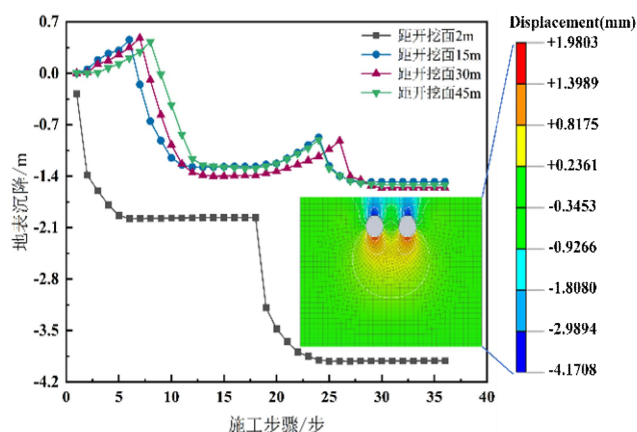


图6 左右线隧道施工完成后的路面变形

通过对图5和图6的对比可以看出,除距开挖面2 m的位置外,其余三种位置处的路面均会出现隆起阶段,并且无论是左线隧道施工还是右线隧道施工,两者的沉降变化规律基本相似,仅在数值上有所不同。首先,这是因为距开挖面为2 m的位置与外部距离很近,不会造成挤土现象,而距开挖面较远时,会出现盾构往里推进而土体无法及时排出,出现挤土现象,造成路面隆起;其次,距开挖面为2 m位置处左线开挖时的初期沉降变形速度比右线开挖时的速度要慢,但造成的最终沉降差异不大,左线开挖完成后的路面沉降为1.97 mm、左右线都开挖完成后路面沉降为3.92 mm,两次开挖对路面所造成的沉降均在2 mm附近;距开挖面分别为15 m、30 m、45 m位置处的路面的隆起和沉降规律几乎保持一致,路面均表现为先出现一定程度的隆起,再发生沉降,与距开挖面2 m位置处不同的是这三个位置处的最终沉降在左线隧道开挖完成之后就几乎全部完成,三者左线施工完成后的沉降分别为1.28 mm、1.40 mm和1.29 mm,右线施工完成后的沉降分别为1.48 mm、1.56 mm、1.52 mm,左线施工完成后的路面沉降已经占据左右线均施工完毕后最终沉降的86.5%、89.7%、84.9%,这说明左线隧道施工对路面沉降的影响要远大于右线隧道施工对路面沉降的影响。此外,不难发现的是上述四个位置处的最大沉降值都不是在最后一个阶段产生,而是最后一个阶段的前几个阶段,这与后期的支护和注浆有关;隧道内的支护结构会减缓路面的沉降速率,再在隧道内进行注浆加固,浆液向四处扩散,会造成土体产生小幅度的隆起,与路面的沉降相抵消,这

就造成了路面沉降的最大值不是出现在最后一个阶段, 因为注浆加固发挥作用需要一定时间。

3.3 左右线施工过程中路面沉降横向变形规律

图7和图8分别为左线隧道和右线隧道施工完成后的路面横向沉降槽, 根据Peck^[19]所提出的地层损失的概念和隧道开挖引起地表沉降的实用预测方法, 认为横向地表沉降槽近似成正态高斯分布, 即peck曲线。对于双线开挖隧道来说, 其横向沉降槽受到多个因素的影响, 如不同地质情况、隧道埋深、地层损失、隧道间距等都会对地表横向沉降的形式产生影响^[20]。但双线隧道的地表横向沉降槽一般呈现“U”型和“W”型, 显然这与图7和图8所展示的沉降槽曲线相吻合。

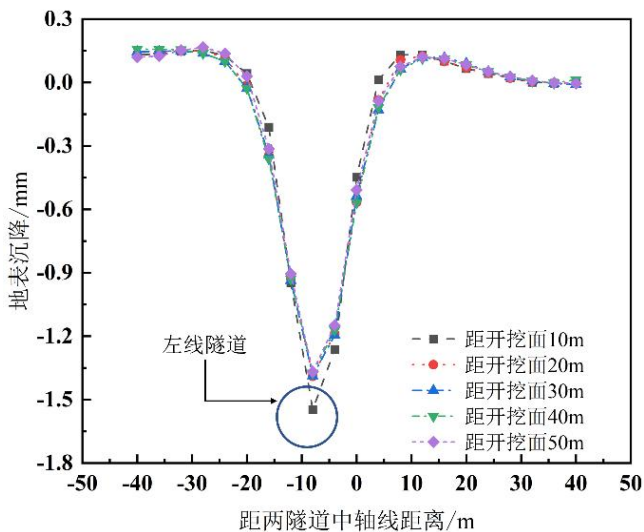


图7 左线隧道施工完成后路面横向沉降槽

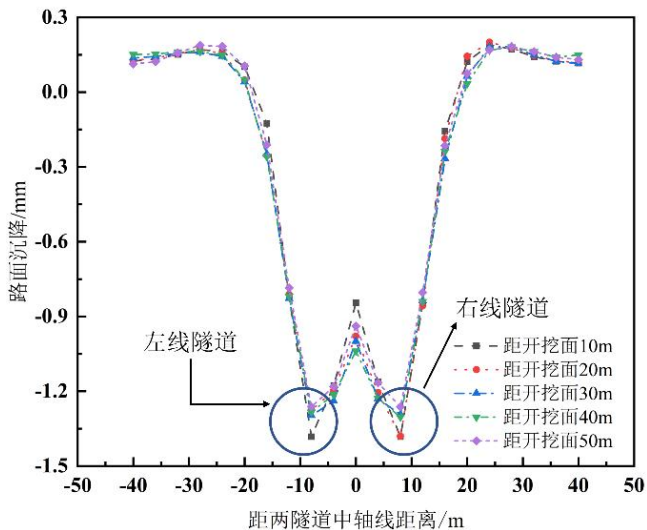


图8 右线隧道施工完成后路面横向沉降槽

3.4 不同施工工况下路面沉降变形规律

由于隧道左线施工完成后地表沉降就已经完成绝大部分, 故只选取Y=25 m位置处左线路面横向沉降值进行对比分析, 研究掌子面支护力对路面横向沉降变形的影响, 得出其变形规律。

3.4.1 掌子面支护力对地表沉降影响研究

图9为不同掌子面支护力情况下地表沉降的对比结果。由图9可知, 随着掌子面支护力的增加, 地表沉降量逐渐减小; 掌子面支护力分别为0. Pa、0. Pa、0. Pa、0Pa, 与之对应的地表最大沉降分别为1.41 mm、1.34 mm、1.29 mm、1.29 mm, 显然随着掌子面支护力的增大, 地表沉降最大值在不断减小, 说明掌子面的支护力对地表沉降起抑制作用, 但对沉降的规律无影响, 沉降规律仍表现为由隧道轴线向两侧递减; 但这种抑制作用并不是无限增加的, 而是随支护力的增加逐渐减小的, 支护力为0.16 MPa时比支护力为0.14 MPa的最大地表沉降减少了0.13 mm, 下降了9.2%, 而支护力为0.2 MPa时与支护力为0.18 MPa时的地表沉降曲线基本相似, 且最大地表沉降也接近, 说明在掌子面支护力达到0.18 MPa以后, 再继续增大也不能显著降低地表沉降, 因此选择掌子面支护力为0.18 MPa比较合适。

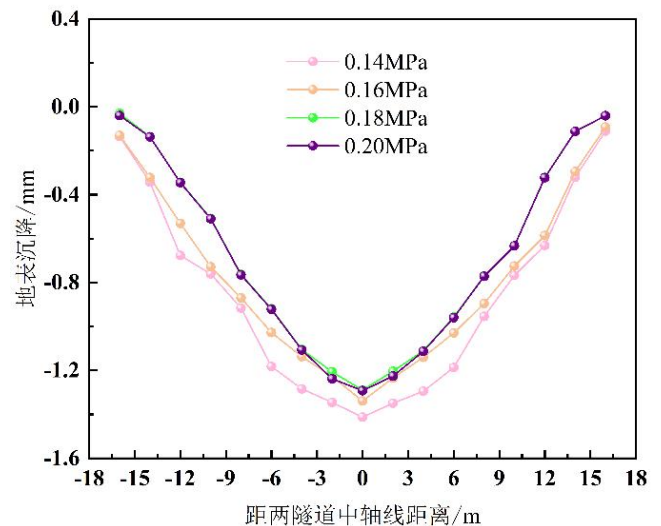


图9 不同掌子面支护力地表沉降对比

3.4.2 盾尾注浆压力对地表沉降影响研究

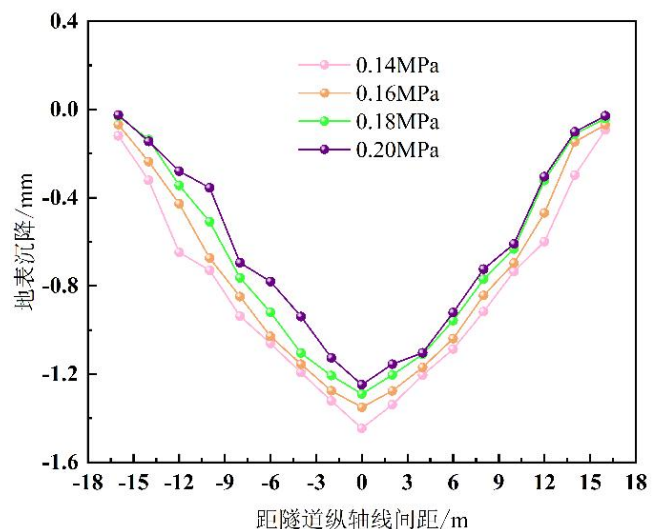


图10 不同盾尾注浆压力地表沉降对比

图10为不同盾尾注浆压力情况下地表沉降的对比结果。由

图10可知,地表沉降最大值随盾尾注浆压力的增加而减小,且在组间盾尾注浆压力增幅相同的时候,其对地表沉降的约束程度逐渐减小,在盾尾注浆压力达到0.18P后再继续增加对地表沉降的抑制作用已经比较微小,并且还可能是因为注浆压力的增加使得管片受力增大,使管片出现破裂的风险,故选择盾尾注浆压力为0.18Pa较为适宜。

4 工程实际分析

4.1 施工建议及监测点布置

根据此次研究的计算结果,建议盾构机掘进压力掌子面支护力为0.18 MPa,盾尾注浆压力为 0.18 MPa,且需施工人员根据现场施工情况不断调整掘进压力以保证掌子面的稳定。此外,掘进机的掘进速度不宜过快,应控制在30 mm/min 以内,否则会造成大量被切削的岩体无法及时排除到洞外,从而引起地表过度隆起。监测点布置如图11所示。

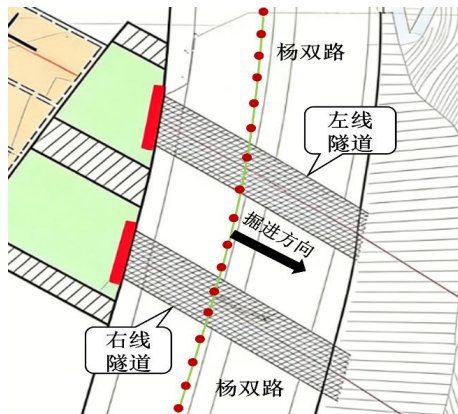


图11 监测点布置

表2 监测控制标准及预警统计

监测项目	监控量测控制值		黄色预警值	橙色预警值	红色预警值
	累计值	变化速率			
地表沉降	30mm	4mm/d	21mm≤S<25mm 或 2.8mm/d≤V<3.4mm/d	25.5mm≤S<30mm 或 2.8mm/d≤V<3.4mm/d	S≥30mm 或 V≥4mm/d

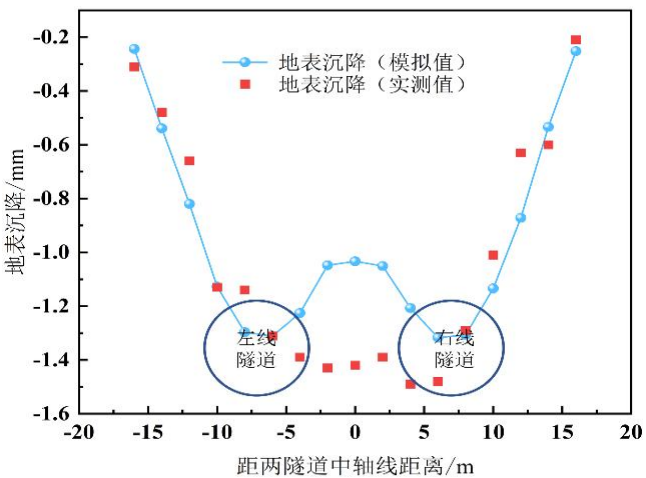


图12 模拟值与现场监测结果对比图

4.2 现场监测结果与模拟结果对比分析

图12为盾构隧道施工完毕后左右线上方地表沉降监测数据与模型计算值的对比结果。由图12可知,地表沉降的现场监测值与模拟值相不大,说明此次模型对现场情况的模拟比较合理,模拟时所选材料参数和计算方法与实际相匹配。从两者的对比可以看出,除在距两隧道中轴线稍远的某几个监测点处的地表沉降值与地表沉降模拟值较接近或比其稍大以外,其余监测点上的地表沉降值均小于模拟值,即模拟值较实际值来说仍有一定的安全容余;由表2可知,模拟值和实测值均小于控制标准的预警值,这也证明了该数值模型对此项工程模拟的合理性。

5 结论

本文以重庆轨道交通27号线工程为例,采用MIDAS-GTSNX有限元软件建立三维地质力学模型,研究了在不同地层加固条件下TBM下穿市政干道的地表沉降的变化规律得出了以下结论:

(1)距开挖面较近处地表纵向沉降表现为初期快速沉降、后趋于稳定;其余地区路面纵向沉降表现为先隆起、再沉降、最后趋于稳定;且在双线施工时,先施工的一条线所产生的地表沉降已经占了双线施工完成后地表沉降的绝大部分。

(2)左线施工时,横向沉降由隧道轴向两侧递减,呈“U”型;双线施工时,最大沉降位于两隧道轴线上方,向两隧道中间递减,呈“W”型,均符合Peck曲线分布。

(3)掌子面支护力和盾尾注浆压力对地表沉降均会产生一定影响,地表沉降值随掌子面支护力和盾尾注浆压力的增加而减小,但两者对地表沉降的抑制作用是有限的,当掌子面支护力和盾尾注浆压力增加到一定值以后,这种抑制作用将不再显著。

[基金项目]

山地复杂地形地貌下TBM始发关键技术研究(20255000010 01483)。

[参考文献]

[1]刘小刚.TBM在岩石城市轨道交通建设中的应用研究[J].现代隧道技术,2012,49(05):15-22.

[2]孙杰,武科,郑扬,等.城市地铁TBM隧道掘进诱发既有建筑物变形的空间属性效应[J].山东大学学报(工学版),2021,51(01):32-38.

[3]张兵.双护盾TBM在城市地铁隧道中的应用研究[J].铁道标准设计,2019,63(10):118-123.

[4]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(04):194-202.

[5]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):3586-3594.

[6]李志军,王明年,于丽,等.护盾式TBM施工下穿河流破碎带稳定性分析及变形控制技术[J].铁道科学与工程学报,2024,21(11):4612-4623.

[7]郑扬,武科,孙杰,等.TBM隧道下穿市政桥梁施工变形规律研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(01):205-209.

[8]杨芝璐,张孟喜,肖晓春,等.超大直径盾构不同角度下穿对既有地铁隧道的影响分析[J].铁道标准设计,2021,65(03):112-118.

[9]高朗,高延达,张社荣,等.小间距双线隧道CRD法零距离下穿既有营运车站变形影响研究[J].铁道标准设计,2017,61(11):95-99+105.

[10]刘赞君,李化云,黄丹.复合地层TBM隧道施工引起建筑物沉降规律研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(04):594-600.

[11]齐勇.盾构下穿既有铁路股道地基沉降控制与加固研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(03):819-827.

[12]王志超,甘露,赖金星,等.盾构下穿铁路路基钢轨变形及路基沉降分析[J].深圳大学学报(理工版),2018,35(04):389-397.

[13]徐干成,李成学,王后裕,等.地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J].岩土力学,2009,(30):269-272+276.

[14]张凤尧.软土地区地铁盾构始发技术研究[D].东南大学,2022.

[15]毛远凤,沈宇鹏,马建南,等.地铁盾构下穿高速公路的路面变形特征分析[J].铁道标准设计,2013,(08):84-88.

[16]房明,刘镇,周翠英,等.新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J].铁道科学与工程学报,2011,8(01):67-72.

[17]罗刚,潘少康,张玉龙,等.双线盾构隧道下穿机场高速沉降及变形规律[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(04):100-108.

[18]路德春,刘竹根,林庆涛,等.盾尾注浆材料硬化特性对隧道和地层力学响应影响的有限元模拟研究[J].北京工业大学学报,2024,50(06):711-723.

[19]郭军,陶连金,边金.盾构法施工地铁区间隧道的地表沉降[J].北京工业大学学报,2005,(06):589-592.

[20]陈春来,赵城丽,魏纲,等.基于Peck公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J].岩土力学,2014,35(08):2212-2218.

作者简介:

梁杰(1990—),男,汉族,四川广安人,本科,工程师,研究方向:轨道工程。

*通讯作者:

王杰(2003—),男,汉族,重庆武隆人,研究生,主要从事岩土工程方向的研究。