

盾构下穿既有地铁隧道沉降研究

贺雪来,龙四春*

(湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;
湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:以溁湖区间下穿既有2号线隧道中MJS加固为工程背景,通过现场监测与数值模拟手段对相关数据进行对比分析,评估MJS加固的效果,结果证明MJS加固对控制地面沉降和变形效果明显,但存在随着弹性模量增大沉降减少效果逐渐降低.同时对比研究了土舱压力对下穿隧道的影响,发现土舱压力对地表变形有影响,但有MJS桩时,其影响程度有所降低.

关键词:MJS;下穿隧道;现场监测;数值计算;沉降;变形

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)03-0037-08

On the Subsidence of Subway Tunnel under Shield Tunneling

He Xuelai, Long Sichun

(Coal Resource Cleaning and Utilization and Mine Environment Protection Hunan Provincial Key Laboratory,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: With Yinghu under wear in the existing line 2 tunnel between the engineering background of MJS reinforcement, through field monitoring and numerical simulation method of related data, this paper compares and analyzes assess the effect of MJS reinforcement, The results show that MJS reinforcement has obvious effect on the control of ground subsidence and deformation, but the effect is decreased with the increase of elastic modulus. At the same time, the influence of soil cabin pressure on the tunnel was studied and the influence of soil cabin pressure on surface deformation was found, but the influence degree of MJS pile was decreased.

Keywords: MJS; down through the tunnel; spot monitoring; numerical calculation; settlement; deformation

城市轨道交通建设过程中不可避免地会出现地铁隧道上跨、下穿已有隧道涵洞的情况^[1].在盾构施工过程中,由于土体损失、周围孔隙水压变化及衬砌变形等因素的存在,土体原始应力将重新分布,原有的土体平衡遭破坏,导致地层发生不同程度的变形.地层变形过大会引起临近隧道土体应力状态的改变,使隧道产生变形,也会在地面产生一定的沉降.这对已运营的地铁隧道来说都是很大的安全隐患,采取措施削减甚至消除这种隐患是非常有必要的.

针对地铁隧道开挖和沉降相关的研究已有一些报道.1969年由美国科学家P.B.Peck提出地铁隧道建设工程中Peck公式是运用最为广泛和普遍的地表沉降的预测方法^[1],P.B.Peck教授搜集了大量的区间隧道开挖时导致地表沉降的实测沉降数据.1981年,Attewell提出横向沉降槽宽度系数*i*主要决定临近地表地层强度及隧道埋深和半径^[2].1996年,英国学者Mair R.J和Breth.H分别考虑盾构下穿砂层和粘土层时对地表建筑物影响^[3].2007年,Ming-Lang Lin等研究了地下隧道开挖对地层变形的影响^[4].2008年,

收稿日期:2018-04-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41474014);湖南省教育厅重点资助项目(15A060)

*通信作者,E-mail:sclong@hnust.edu.cn

Paul Simon Dimmock 研究盾构开挖建筑刚度效应^[5].1998 年,日本三井建设对东京文京区地铁 12 号线施工区间粘土、细砂地层进行水平、垂直和斜向施工,安全穿过该地层.2004 年,徐俊杰利用大型有限元通用软件 ANSYS 对施工过程进行了三维有限元动态施工模拟,结合现场监测结果,得出地质条件与沉降大小密切相关的结论^[3].2009 年,丁勇春通过前处理软件解决 FLAC^{3D}在前处理建模方面不足,编写了能够反映土体单元先期固结压力影响的修正剑桥模型子程序,为复杂环境下深基坑变形预测提供了技术途径^[4,5].2009 年,谷小朋对水平旋喷桩支护机理与效果进行研究,建立水平旋喷成壳力学模型^[6].2010 年,冯超在以黄土地区的地铁盾构施工工程为背景,采用 PECK 公式、理论预测、现场监测以及 FLAC^{3D}模拟计算研究,分析发现随黄土粘聚力、内摩擦角提高,城墙基础沉降及地表沉降均有所减缓^[7].2016 年,梁建波应用有限元软件 MIDAS-GTS 建立盾构下穿既有隧道的盾构开挖模型.发现注浆过程中适当提高同步注浆压力可减少既有隧道沉降^[8].但是目前考虑 MJS 的下穿以运营隧道的相关施工研究很少.

本文以长沙市溁湾镇站下穿既有 2 号线作为研究对象,考虑 MJS 加固、土舱压力和掘进速度等因素,通过数值计算和现场监测等方法,将计算数据与实测数据对比分析,研究盾构施工中采用 MJS 加固方法以及与之配合的土舱压力和掘进速度的施工方案,在保证工程安全的前提下,为施工提出合理可行的建议.

1 工程背景

1.1 工程概况

轨道交通 4 号线溁湾镇站-湖南师大站区间采用盾构法施工,区间纵坡为单向坡,最小坡度 0.2%,最大坡度 2.6%,竖曲线半径分别为 3 000 ,5 000 m.地铁 4 号线区间左线和右线分别始发 38.7,28.7 m 后下穿既有地铁 2 号线,交叉段距离为 27 m.既有 2 号线区间隧道采用盾构法施工,内径 5.4 m,外径 6.0 m.4 号线区间与既有 2 号线区间隧道轮廓最小竖向净距为 2.863 m.图 1 为盾构下穿既有轨道交通 2 号线的位置关系与地质剖面图,图 2 为模拟区域平面图.

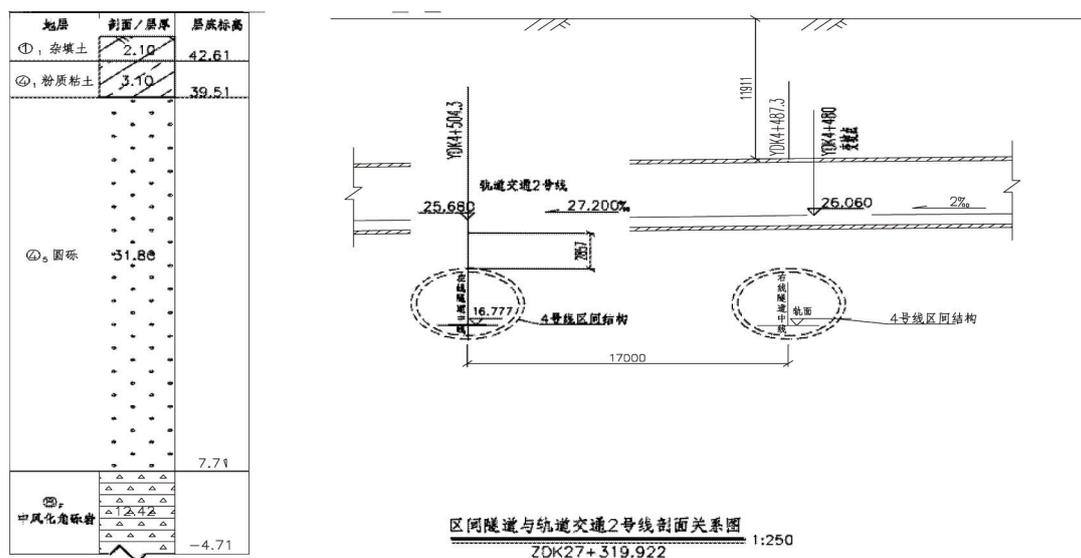


图 1 下穿位置关系与地质剖面

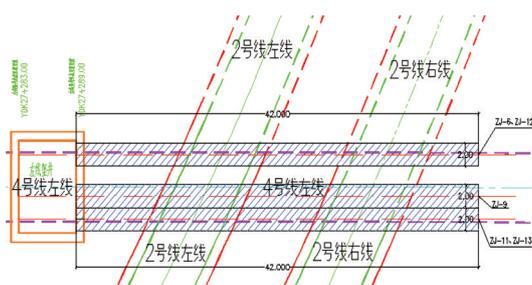


图 2 模拟区域平面

1.2 监测项目

自动化监测测点布设在在建4号线与既有地铁隧道2号线交汇处,2号线上(右线)、下(右线)行线穿越范围25 m+两侧各延伸12.5 m,共50 m范围.点位布置:在2号线上行线隧道施工影响区域内布置11组监测断面每组2个点,按2号线环号间隔3 m布置,监测频率为4次/d,时间分别为5:00,11:00,17:00,23:00,监测点具体情况如图3所示.地表监测点设在在建隧道正上方,断面之间相距约10 m,每个断面左右两侧各布置7个点,离中心点两侧的点相距约分别为3 m.

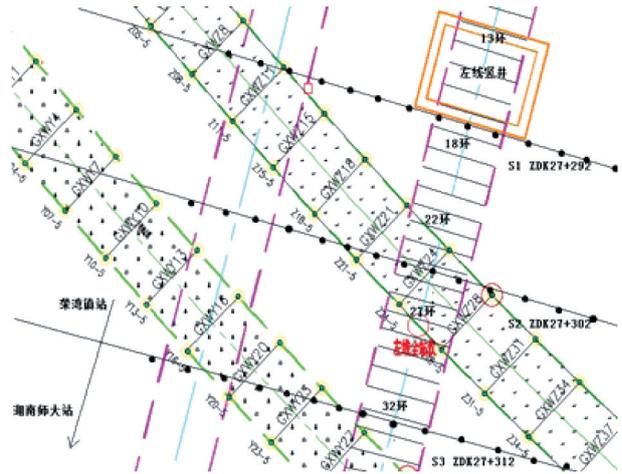


图3 地表监测点及既有隧道监测点

1.3 MJS 加固

MJS 工法(Metro Jet System)又称全方位高压喷射工法,已经作为较为成熟的工法而广泛运用于实际工程中.其采用了独特的多孔管和前端造成装置,实现了孔内强制排浆和地内压力监测,并通过调整强制排浆量来控制地内压力,大幅度减少对环境的影响^[9].

既有2号线区间隧道采用盾构法施工,内径5.4 m,外径6 m,4号线区间与既有2号线区间隧道轮廓最小竖向净距2.86 m.设计采用“竖井+MJS水平旋喷”方案对既有2号线隧道进行预保护^[10,11].每个竖井设置13根直径为2.0 m半圆水平旋喷桩,每根桩长42 m,具体布置见图4.

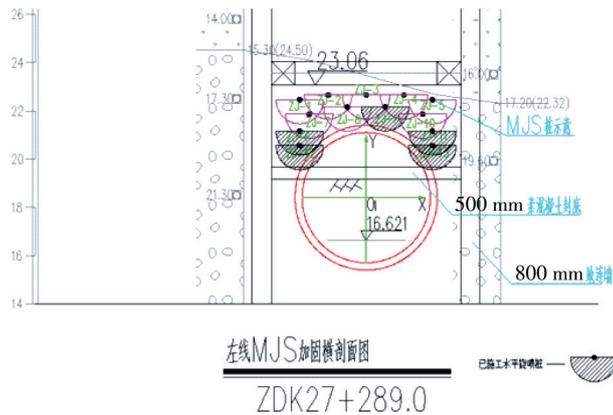


图4 MJS 桩加固剖面

2 模型设计与数值模拟

2.1 数值模型

由于MJS加固体是半环绕的隧道,且上下两条隧道是斜交关系.前处理建模软件采用Hypermesh进行,所得在建隧道与既有隧道之间位置关系具体效果如图5所示.

2.2 边界条件和参数选取

本次模型取地表为自由边界,边界尺寸为60 m×50 m×45 m,其他面法向固定.其中节点数为50 659个,单元数为176 237个.隧道土体开挖采用空模型,土体采用摩尔-库伦模型,盾构管片采用壳单元^[12].MJS桩采用弹性模型根据实际情况,既有2号线隧道埋深11.9 m.在建的4号线隧道埋深约19 m,隧道外径6 m.内径5.4 m.管片每环幅宽为1.5 m.厚度0.3 m.在开始建模前需要对模型进行分析,本次建模主要考虑的土层有4层以及MJS条状桩,具体如图6所示.因为,本次主要讨论盾构下穿时,既有隧道及地表沉降的变化.因此为了简化模型,假设各土层为均匀水平分布;弹性材料为各向同性的连续弹性材

料,材料塑性服从屈服准则,盾构掘进过程中盾壳中心轴线与开挖中心线重合.下穿隧道位置情况具体如图 6 所示.

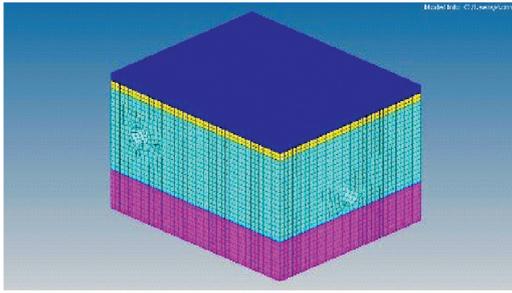


图 5 整体计算模型

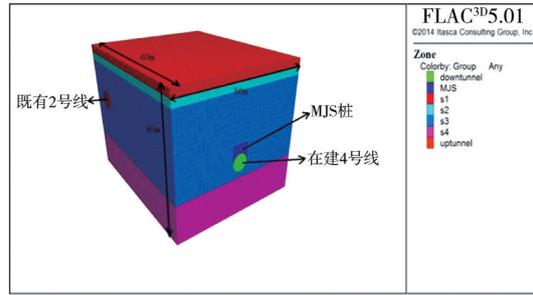


图 6 盾构施工模拟整体模型

根据工程勘察报告、相关规范手册和论文资料等,确定土体参数与结构参数,如下表 1 和表 2 所示.

表 1 岩土计算参数

岩土名称	密度/(kg/m ³)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	粘聚力/kPa	厚度/m
杂填土	1 750	2.50	1.28	12.0	2.1
粉质粘土	2 070	7.60	7.30	16.5	3.1
圆砾	1 980	19.40	14.50	\	28.7
中风化角砾岩	1 900	4.46	2.68	18.0	12.4

表 2 结构材料计算参数

结构名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/m
管片	2 500	25.3(C50)	0.25	0.3
MJS 桩	2 500	0.7	0.20	2.0

2.3 计算工况设置

盾构下穿过程中,扰动区对既有运行 2 号线隧道影响大,不加以重视容易发生重大安全事故,本次不同弹性模量的 MJS 材料施工区域内地层主要为圆砾、中粗砂、粉质粘土、强风化角砾岩、中风化角砾岩、全风化泥岩和 中风化泥岩.根据工程实际情况,结合本次模拟计算目的,MJS 加固的参数拟考虑多种变化,具体如表 3 所示.

表 3 MJS 加固的不同参数设定

名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/m
桩体一	2 500	700	0.2	2
无桩体	/	/	/	/

盾构下穿既有地铁 2 号线工程采用的是土压平衡、微扰动掘进模式.在新、旧隧道交叉区域全断面为圆砾岩层,稳定性较好,但新建 4 号线隧道顶部距离既有 2 号线隧道地面只有 2.863 m,在盾构掘进时应尽量不扰动盾构机上部地层,因此在盾构穿越前阶段(大约距既有 2 号线隧道 20 环约 30 m 范围),盾构机应开始采用微扰动、土压平衡模式.施工参数选定如表 4. 在建 4 号线左线盾构下穿既有 2 号线隧道施工进度情况如表 5.

表 4 盾构施工参数

名称	施工参数
土舱压力	0.3~0.4 MPa
油缸推力	1 000~1 800 T
刀盘扭矩	1 800 kN /m ³
掘进速度	15~25 mm/min
出土量	70 m ³
同步注浆压力	0.4~0.6 MPa

表 5 盾构施工进度

时间	施工进度
2017 年 4 月 11 日 3 时	刀盘掘进至 4 号线结构边线(18 环)
2017 年 4 月 11 日 14 时	盾尾掘进至 4 号线结构边线(22 环)
2017 年 4 月 12 日 2 时	刀盘离开 4 号线结构边线(27 环)
2017 年 4 月 12 日 17 时	盾尾离开 4 号线结构边线(31 环)

3 模拟分析

3.1 MJS 桩基施工加固模拟分析

在盾构下穿过程中,对地层进行 MJS 桩基施工加固,在既有隧道与在建隧道之间形成一道隔离幕墙,起到隔离保护作用^[13].同时,MJS 桩虽然能加固土层,但桩基施工期间必然对加固区域土体进行扰动,导致加固区域力学参数急剧减少.因此,在模拟时,采取先将加固区土层参数取原土层 1/3;在施工完成,即水泥土硬化后,再将加固土层赋原始参数^[14,15],通过 2 次平衡计算得到 MJS 桩.本文将讨论不同工况下对既有隧道与地表沉降的影响,因此选取 2 组云图作对比分析,所得模拟对比云图见图 7.

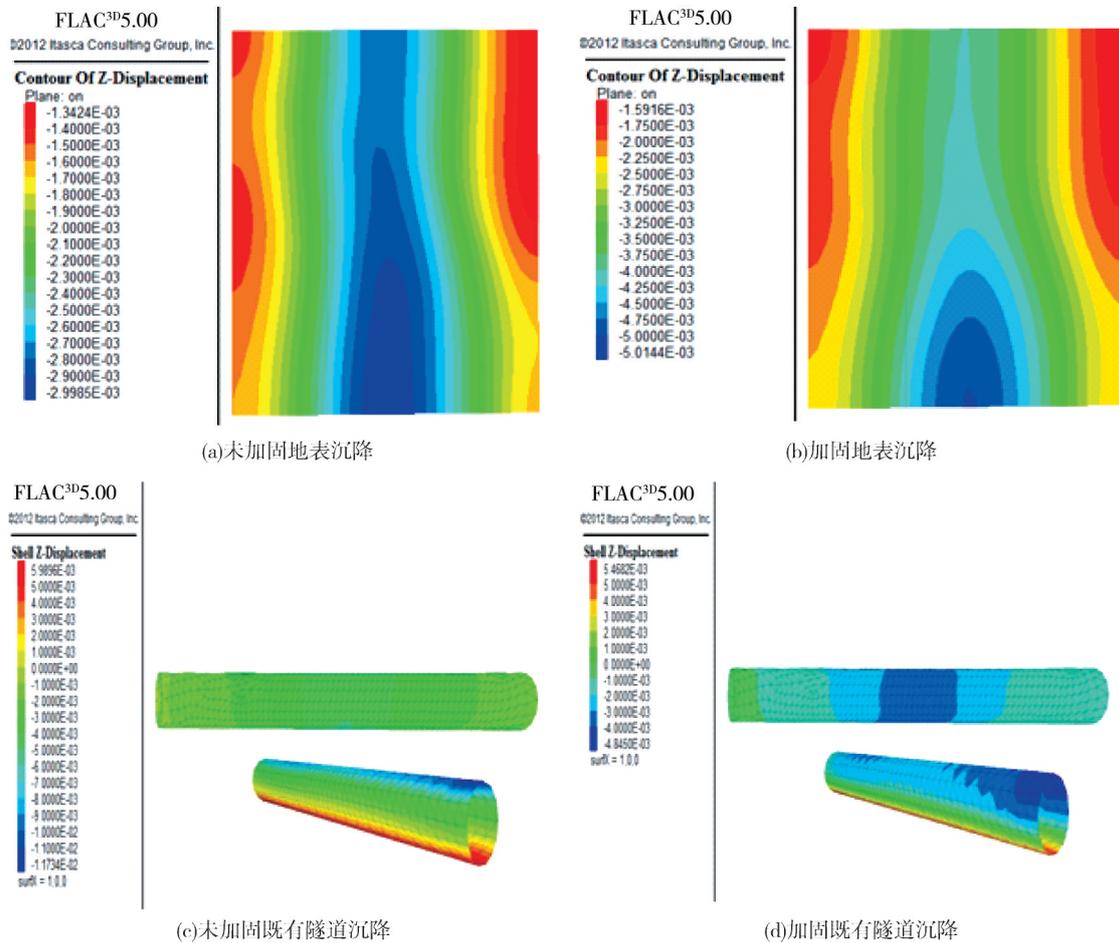


图 7 模拟加固与未加固最大累计沉降云图

从图 7 可见,地表沉降最大的区域分布在地铁施工中轴线上,但加固工况下,地表沉降在加固区域沉降明显减少.既有隧道沉降最大的区域分布在下穿中心位置,但在加固工况下,既有隧道在加固区域沉降减少且在在建 4 号线隧道上方沉降也明显减少(未加固最大沉降为 1.173×10^{-2} m,而加固最大沉降则为 -4.845×10^{-3} m).同时,比较地表最大沉降以及既有隧道沉降槽最大沉降曲线对比曲线图如图 8.

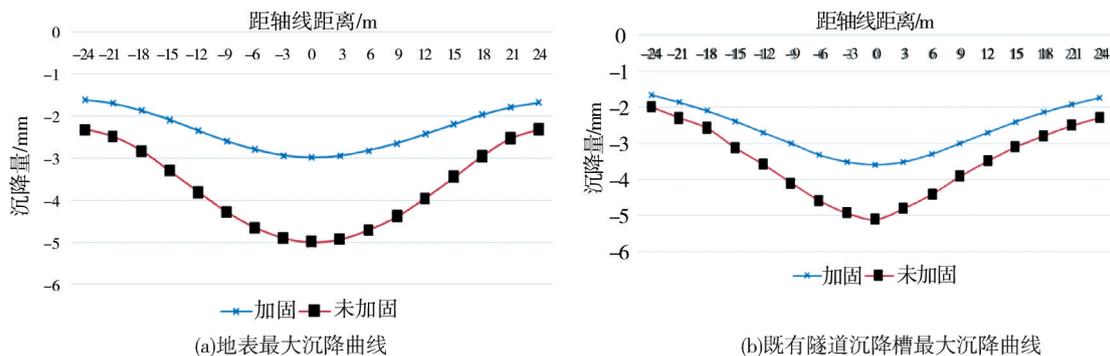


图8 模拟数据最大沉降值断面沉降量

从图8可以看出地表累计沉降最大值为 -2.99 mm ,未加固地表累计沉降最大值为 -5.01 mm ,减少了 2.02 mm .其中既有隧道最大沉降值为 -3.56 mm ,未加固既有隧道沉降最大值为 -5.12 mm ,减少了 2.56 mm .减少量较为明显.且地表沉降比既有隧道少,而既有隧道沉降槽沉降量相差不大.

3.2 加固条件下改变土舱压力模拟分析

实际工况中,改变土舱压力对地表及既有隧道沉降的具有一定的影响.本文考虑在MJS桩加固的条件下改变土舱压力对沉降的影响是否有变化.因此,取5组不同的土舱压力分别是 $0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35\text{ MPa}$,在加固工况下模拟掘进.得到既有隧道在整个模拟下穿完成稳定后地表以及既有隧道最大沉降槽曲线如图9所示.

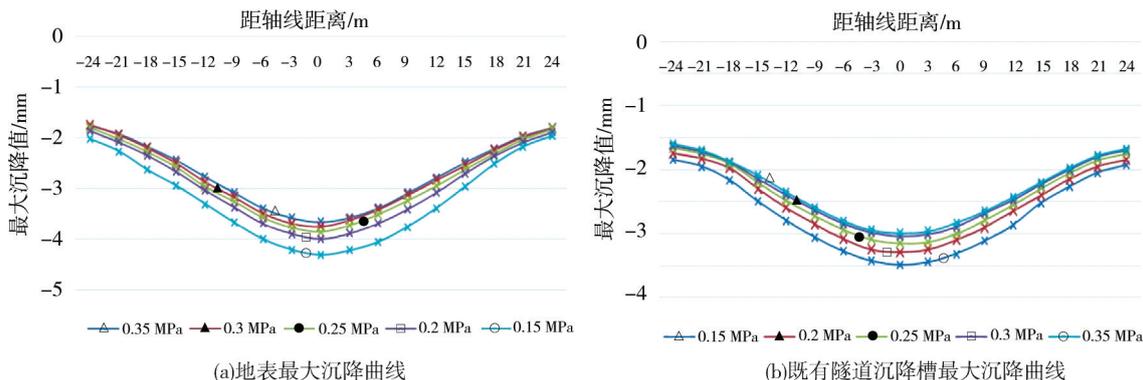


图9 不同土舱压力下既有隧道沉降

从图9可知,当土舱压力增大时地表最大沉降与既有隧道沉降槽最大沉降都减小,其中既有隧道最大沉降为土舱压力 0.15 MPa ,其沉降值为 -4.31 mm .地表最大沉降值为 -3.49 mm .但从曲线上来看,减少的量不明显.

3.3 未加固条件下改变土舱压力模拟分析

取2组不同的土舱压力在未加固工况下模拟掘进.进行有限元模拟计算分析既有隧道结构在盾构下穿完成的最大沉降,得到既有隧道在整个模拟下穿完成稳定后地表竖向沉降位移云图如图10所示,变化曲线如图11所示.

从图10可见,增大土舱压力不论地表还是既有隧道沉降都有所减少.从图11可以看出,在加固状态下轴线断面沉降槽沉降曲线基本保持直线.未加固状态下,最大沉降差值位于距离模拟段开挖始发 60 m 处,最大沉降差值为 1.14 mm ,而在加固状态下则只有 0.41 mm .同时可以发现在未加固状态下轴线断面在下穿部位开始略微隆起,其原因是由于没有桩体加固,没下穿部位围岩扰动引起土体沉降直接反应在地表,而下穿部位掘进引起围岩变化部分被既有隧道阻挡,侧面说明既有隧道具有一定的遮蔽效应.且根据曲线趋势有下降迹象,脱离下穿部位又开始略微沉降,更加说明既有隧道的遮蔽作用.

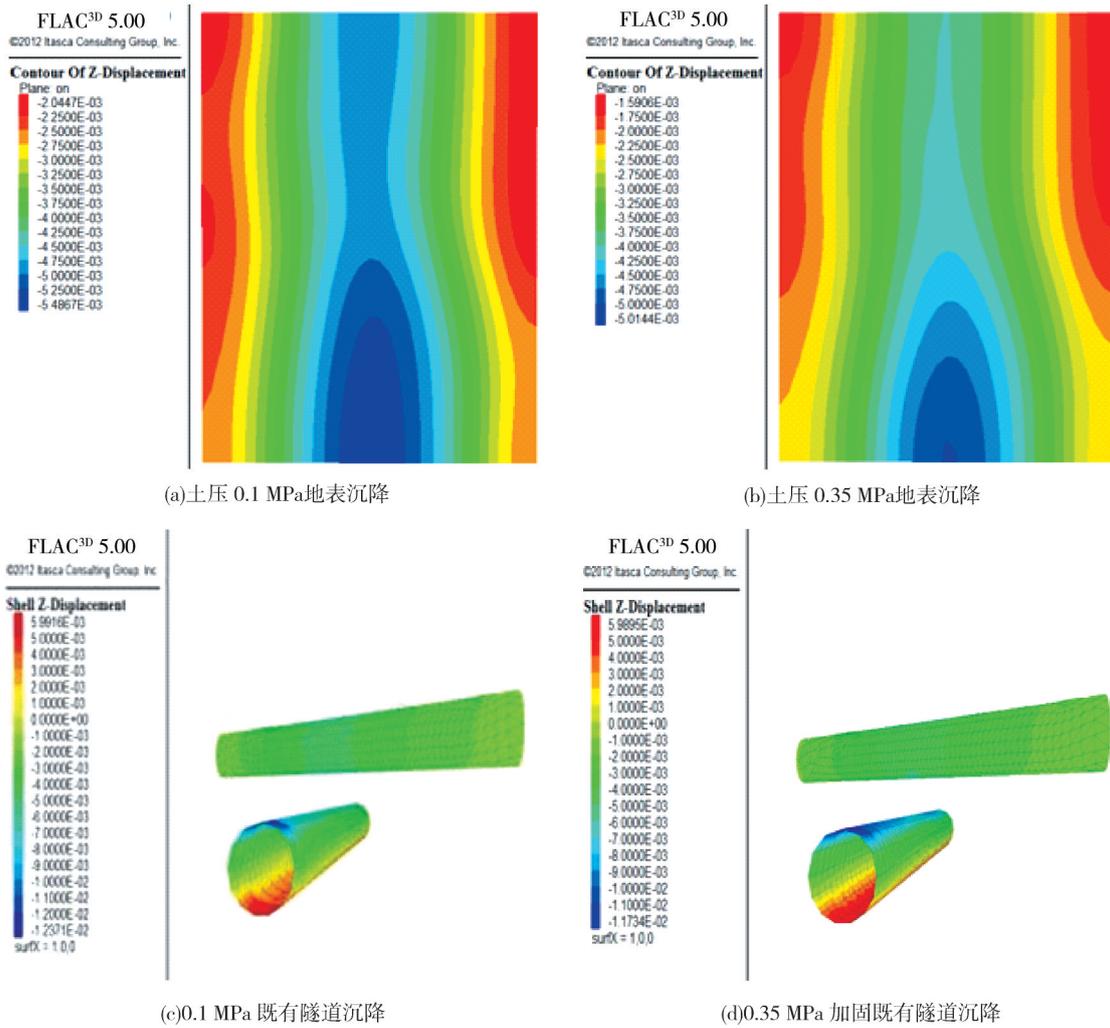


图 10 模拟未加固地表沉降云图

图 12 为不同参数下既有隧道沉降槽沉降曲线与实测数据比较线图,从图 12 可以看出,在加固状态下既有隧道沉降槽沉降曲线之间差距同样不大,最大沉降值分别为 0.15 MPa 土舱压力的-3.29 mm,最大沉降差值为 0.3 mm.未加固状态下,最大沉降值分别为 0.15 MPa 土舱压力的-6.17 mm.最大沉降差值为 0.93 mm.从图 11 和图 12 可以看出,在加固之后土舱压力的影响有所减少.

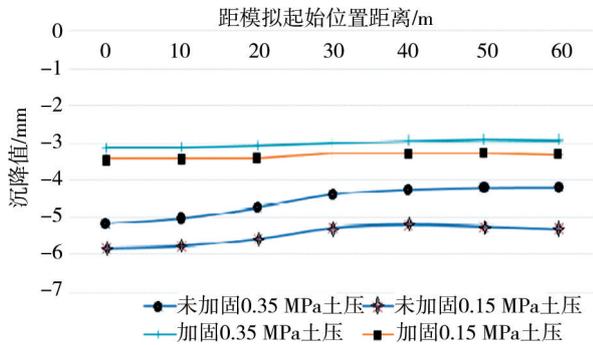


图 11 不同参数下地表轴线上沉降曲线与实测数据比较

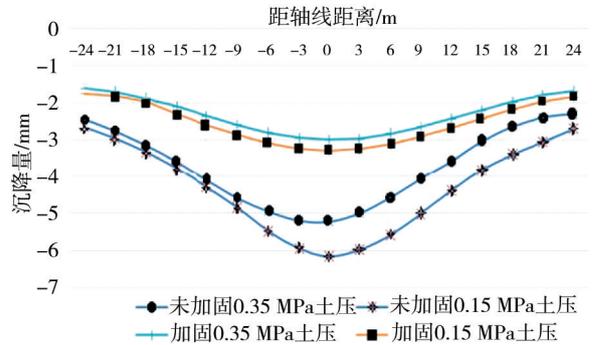


图 12 不同参数下既有隧道沉降槽沉降曲线与实测数据比较

3.4 与监测结果对比分析

本次模拟 MJS 桩弹性模量取 700 MPa,土舱压力取 0.30 MPa.并取溁湾镇站地铁隧道稳定后的实时监测的地表监测数据以及既有隧道自动监测数据.下穿时期的监测数据与模拟数据对比,得到图 13.

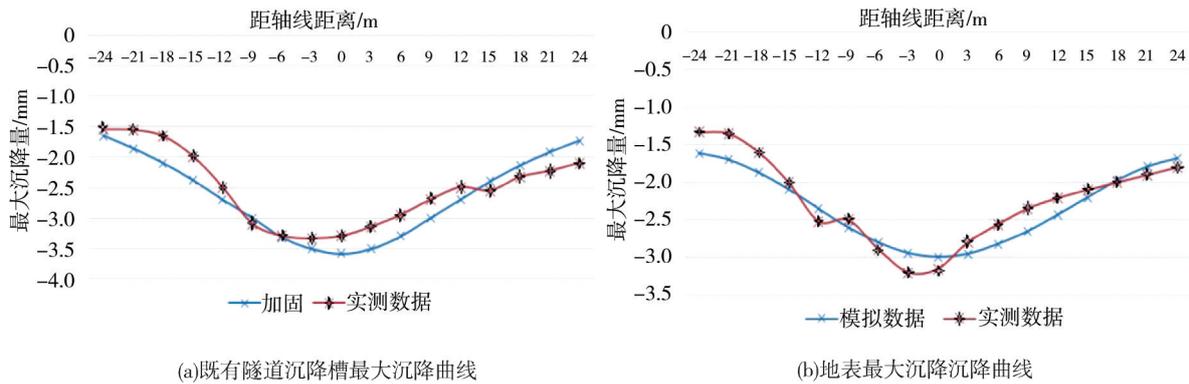


图13 实测数据与模拟数据对比

从图13可以看出,地表最大沉降实测值为 -3.15 mm ,模拟值为 -2.99 mm .隧道沉降槽最大沉降值为 -2.83 mm ,模拟值为 -2.66 mm .模拟数据曲线基本符合实测数据曲线,模拟效果较好.

4 结论

1) 模拟数据与实测数据变形曲线趋势较为一致,模拟数据与实测数据最大值较为吻合,说明有限元模拟结果从宏观上能较真实反映出现场状况.

2) 采用MJS加固方法对于在盾构下穿施工中减小地面沉降和上部隧道变形效果较为显著,在一定范围内MJS施工质量越好则变形控制效果越好.

3) MJS加固体的存在对于控制周边变形存在遮蔽效应,遮蔽效应对隧道竖向变形和地面沉降影响较大,MJS桩的存在减少了施工参数对地表及既有隧道结构沉降的影响.同时,在加固状态下,土舱压力对沉降的影响有所减少.

参考文献:

- [1] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [M]. New York: ASCE, 1984.
- [2] Attewell P B, Woodman P J. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivative caused by tunneling in soft [J]. Ground engineering, 1982, 36(11): 12-22.
- [3] Mair R J, Taylor R N, Burland J B. Prediction of ground movements and assessment of risk building damage due to bored tunneling [C] // Fourth International Symposium of International Conference of Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground. London, 1996: 713-718.
- [4] Lin M L, Chung C F, Jeng F S, et al. The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels [J]. Engineering Geology, 2007, 92(3): 110-132.
- [5] Dimmock P S, Mair R J. Effect of building stiffness on tunnelling-induced ground movement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2008, 23(4): 438-450.
- [6] 徐俊杰. 土压平衡盾构施工引起的地表沉降分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [7] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [8] 丁勇春, 王建华, 徐斌. 基于FLAC^{3D}的基坑开挖与支护三维数值分析 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 977-979.
- [9] 谷小朋. 水平旋喷桩预支护作用机理及效果的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [10] 冯超. 地铁隧道盾构施工引起的地表变形规律研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [11] 梁建波. 盾构下穿地铁隧道施工中对既有隧道沉降 [D]. 广州: 广州大学, 2016.
- [12] 曹振. 西安地铁盾构施工安全风险评估及施工灾害防控技术 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [13] 褚东升. 长沙地铁下穿湘江土压平衡盾构隧道掘进参数研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [14] 黄建丹, 宫全美, 孟庆明, 等. 漂石地层土压平衡盾构掘进速度模型研究 [J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 38-41.
- [15] 颜治国. 西安地铁黄土层中盾构隧道地表沉降控制理论与技术 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.