

# 太原地铁盾构施工对地表及建筑物沉降影响分析

贾宝宏<sup>1</sup>, 王冰涵<sup>2</sup>, 许贵阳<sup>3</sup>, 王鹏飞<sup>4</sup>

(1.太原轨道交通集团有限公司, 山西 太原 030002; 2.太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024;

3.城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 北京 100044;

4.太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**太原一、二号地铁联络段位于大南门站附近,采用明挖加盾构的施工方法。此联络线曲率大、坡度大,所处位置地质条件复杂敏感,盾构区间下穿迎泽公园。为控制盾构时土体扰动对建筑物的影响,在重点地区布置监测点进行土体和建筑物沉降监测,采用有限元软件 ANSYS 对该盾构区间部分风险点进行三维建模分析,将所得计算数据与现场监测数据对比分析,得出盾构位置变化对监测点土体以及建筑物沉降的影响。

**关键词:**盾构隧道;邻近建筑物;地表沉降;ANSYS

**中图分类号:** U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0085-07

## 0 引言

随着中国城镇化的推进,轨道交通建设快速发展。考虑到客流量等因素,地铁线路大部分需穿过建筑物密集地段,故城市铁路隧道多采用盾构法施工,但施工所造成的地面沉降是不可避免的。为控制地层变化对地表建筑物的影响,在盾构掘进过程中对临近建筑物和关键风险点进行监测分析、模拟,并根据分析结果对该地区建筑物进行风险点监测,采用相应加固措施,这对建筑物的保护具有深远意义。

目前研究盾构施工对邻近建筑物所造成的沉降影响的方法主要包括解析法<sup>[1]</sup>、模型试验法<sup>[2]</sup>、经验公式法以及数值模拟法。解析法主要考虑盾构的施工特点以及土体的力学性质,采用物理数学模型研究地表变形以及地层沉降规律,其特点利于分析初始地质问题,但对复杂地质应用受限。模型试验法是依据实际工程背景建立缩小版的现实三维模型,在实验室内模拟盾构施工所造成的地层变形以及地表沉降情况,其特点是与实际工程契合度高,但其制作成本高。经验公式法是 Peck<sup>[3]</sup>在传统统计理论上,将自身理论分析与实践推断有机结合起来,将在实际工程中的理论实践和经验量化形成一种能够很好地适用现场和实际工程情况的计算方法,对于地表沉降物数据进行分析具有科学和逻辑性的综合分析和归纳,其特点是简单易操作,但受限于土体特性。数值模拟法是伴随着计算机技术的不断提高而逐渐完善的一种方法,可以应用分析盾构施工中对地表沉降、地层变化以及周衬砌变形等问题,通过限制土层等因素不变,研究某一因素变化而造成的影响。Rowe et al<sup>[4]</sup>通过计算机编程将隧道盾构施工参数化,对施工过程进行优化,研究分析土体应变情况。周健等<sup>[5]</sup>对武汉地铁开挖断面进行研究,利用有限差分软件 FLAC3D,预测隧道开挖对地层及周围建筑物变形影响,提出地层损失率控制量结论。后期郭轅<sup>[6]</sup>以及卢岱岳等<sup>[7]</sup>采用数值模拟法运用于实际工程案例中,得出与理论推导相吻合的研究数据,证实数值模拟的可靠性。

数值模拟法可反映实际工程情况,在建模时可根据实际设定相应的参数,模拟研究盾构施工过程中对周围地层土体以及建筑物所造成的影响<sup>[8-9]</sup>,故采用此研究方法,利用 ANSYS 软件进行数值模拟分析。目前,太原地铁所规划的路线正在建设中,其中地铁一、二号线联络段较为特殊,采用盾构法施工,利用

收稿日期:2022-03-21 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220060

基金项目:山西省自然科学基金(20210302124354)

作者简介:贾宝宏(1969—),男,高级工程师,研究方向为隧道工程。E-mail:249509586@qq.com

贾宝宏,王冰涵,许贵阳,等.太原地铁盾构施工对地表及建筑物沉降影响分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(3):85-91.

ANSYS 软件对该区段进行数值模拟分析<sup>[10]</sup>,研究盾构施工通过建筑物时所造成的地层及建筑变化,通过与实地监测数据进一步分析对比,得出其变化规律,为盾构隧道施工过程中保护建筑物提供理论依据<sup>[11]</sup>。

## 1 工程概况

由 2 号线大南门站南端引出的地铁 2 号线与 1 号线联络线区间,以半径 200 m 的平面圆曲线下穿迎泽公园后接入 1 号线大南门站东端。联络线设计范围起点里程 L21K-0+000.000,终点里程 L21K-0+386.406,全长 386.406 m。施工总平面图如图 1 所示,图 2 为联络区间工程示意图。



图 1 联络段总平面图

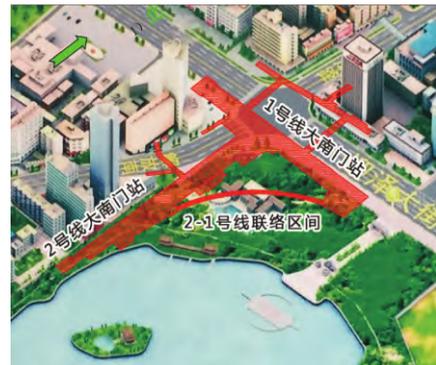


图 2 工程示意图

联络线位于迎泽公园内,不影响周边道路。其中 L21K-0+107.269~L21K-0+255.559,采用盾构法施工,其余部分采用明挖法施工。盾构段长 148.29 m,全线呈单坡,坡度 33.00‰,区间埋深 13.5~17.2 m。盾构区间在 L21K-0+130.000~L21K-0+230.000 里程范围迎泽阁最小水平距离为 5.92 m。隧道工程特点为曲率大、坡度大,且所处位置地质条件复杂敏感。

研究盾构区间里程范围内施工过程对周边地层以及建筑物所造成的影响。考虑到本隧道所处地质条件、位置以及联络段端的施工方法,对隧道的进口端、出口端以及保护建筑物进行监测。进出口端沉降监测点布置、建筑物与隧道的相对位置以及计算阶段如图 3 所示,进口端和出口端各布置 8 个测点监测地表下沉,从左至右布置,其分布情况如图 4 所示。

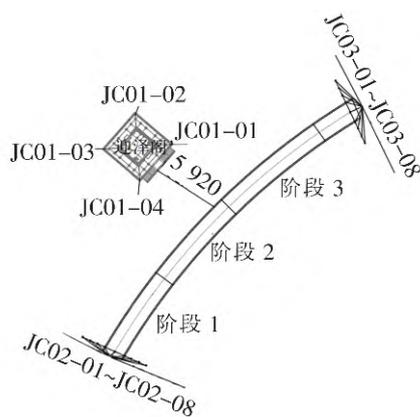


图 3 建筑物位置及监测点

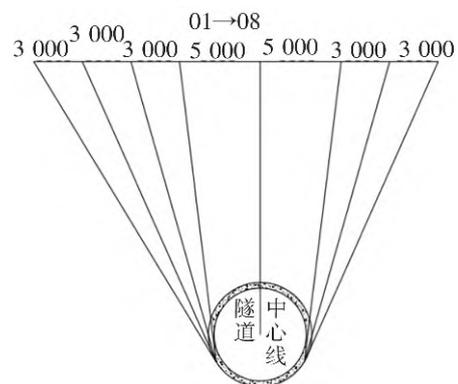


图 4 进出口端地表沉降测点分布(单位:mm)

## 2 模型建立

盾构施工过程中,其范围内的建筑物也会对工程产生一定的影响,主要包括 2 方面:①建筑物的基础与地层土体的相互作用影响;②建筑物的自重通过基础向土体进行扩散,会对盾构施工过程中的应力场重分布产生影响。

采用 ANSYS 软件进行数值模拟,先用 CAD 软件对隧道整体轮廓线进行 3D 绘制,随后导入 ANSYS 中的 Spaceclaim 模块进行隧道实体建模。

### 2.1 模型基本假定

考虑到上述的 2 个影响因素,所建立的计算模型,将建筑物基底压力转化为均匀分布荷载模拟,建筑物的基础采用实体模型模拟,考虑实际因素,经查阅资料,建筑物的均布荷载选取为 120 kPa<sup>[12-13]</sup>,建筑物基础、隧道管片、注浆层以及地层土体采取实体单元模拟,选取 Mohr-Coulomb 模型作为土体本构模型,见图 5,土体的破坏多以剪切破坏存在,故 Mohr-Coulomb 屈服准则对土体的破坏形式能够准确反映,该准则是剪应力屈服准则,认为材料某平面剪应力达到某一特定值时就进入屈服,其准则方程为

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中,  $C$  为土的黏聚强度;  $\varphi$  为内摩擦角。用普通三轴试验,可测定发生在某破坏面时主应力表达的破坏准则。如果已知三轴试件内破坏面与小主应力方向之间的倾角为  $\varphi$ ,则由普通三轴试验的莫尔圆,将破坏面上的剪应力与法向应力代入库仑破坏准则,得到 Mohr-Coulomb 准则

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2C \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (2)$$

通过研究该区间的地质勘察报告可得,本区间所揭露岩土地层分布较为稳定,均为第四系(Q)地层。地表多为第四系人工填土(Q4ml),其下为第四系全新统冲洪积(Q4al+pl)黏质粉土、砂(粉)类土、圆砾土及上更新统(Q3al+pl)粉质黏土、砂类土等组成。具体参数如表 1 所示。

表 1 地层土工参数表

材料	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	等效厚度/m	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
建筑物基础	20.0	30 000.00	0.20	2.00	—	—
管片	25.0	26 000.00	0.20	0.35	—	—
注浆层	21.0	1 000.00	0.20	0.10	—	—
杂填土	17.3	5.85	0.30	8.10	10	12.5
黏质粉土	19.6	19.50	0.27	9.70	16	14.5
粉细砂	22.5	30.00	0.28	19.20	0	29.6

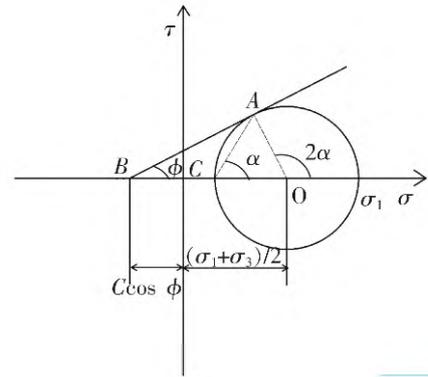


图 5 Mohr-Coulomb 准则示意图

### 2.2 模型边界

采用 ANSYS 对太原地铁 2 号线与 1 号线联络线区间风险点进行数值分析模拟,以盾构区间需保护的迎泽阁作为研究对象,所选取计算模型尺寸为:横向( $x$ ) $\times$ 纵向( $y$ ) $\times$ 竖向( $z$ )=80 m $\times$ 150 m $\times$ 37 m。将水平位移约束作用于土体模型的左右侧面,竖向约束作用于土体模型底面,隧道地层土体以及建筑物基底计算模型如图 6 所示。

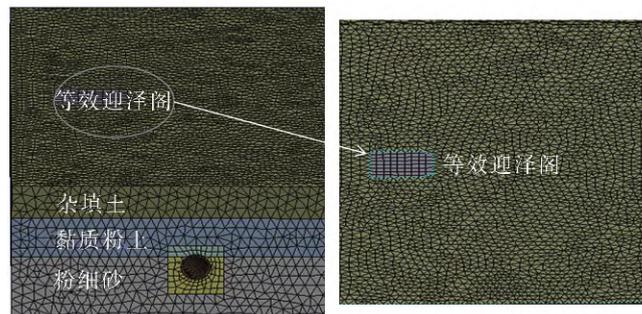


图 6 三维模型图

### 3 建筑物沉降分析

盾构隧道施工过程中,随着盾构的临近、侧邻以及离开,建筑物与地表的沉降值也在不断发生变化,这一沉降值的大小对于建筑物的安全与否具有直接影响,故在其施工中应该予以严格控制。通过模拟太原一、二号联络线盾构开挖过程,分析盾构隧道施工时,建筑物与地表的沉降量随着盾构到达建筑物之前(阶段 1)、盾构掘进至建筑最近一点(阶段 2)以及盾构离开建筑物(阶段 3)3 种情况的变化规律。

#### 3.1 隧道掘进通过迎泽阁前后各监测点沉降变化规律

图 7 所示为各监测点在隧道临近、侧邻以及离开迎泽阁 3 个阶段的沉降变化,图 7 中的数据为现场监测仪器在各阶段的监测数值,以下图中纵坐标正值为沉降状态,负值为隆起状态,其中监测点 JC01-01、JC01-03 以及 JC01-04 在 3 个阶段处于沉降状态,而 JC01-02 处于隆起状态,建筑物整体向隧道一侧倾斜,其中 JC01-02、JC01-03 位于同一侧,两者发生不同变化,会导致建筑物的另一侧开裂,故应做好加固措施,保护建筑物。

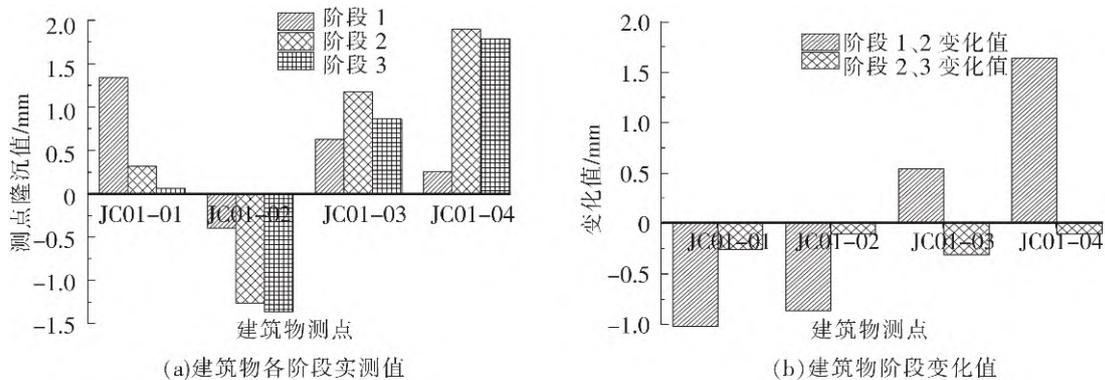


图 7 隧道掘进前后建筑物测点沉降变化

图 8、图 9 所示为各监测点在隧道临近、侧邻以及离开迎泽阁 3 个阶段的沉降变化,图 8、图 9 中的数据为现场监测仪器在各阶段的监测数值。由图 8 可知,进口端监测点在前 2 个阶段发生一定变化,但随着盾构逐渐远离,后 2 个阶段各监测点沉降变化减小,说明在盾构开始阶段对洞口端加强监测,防止意外;相反,对于出口端的监测要随着盾构掘进靠近,增强监测频率,做好防护准备。

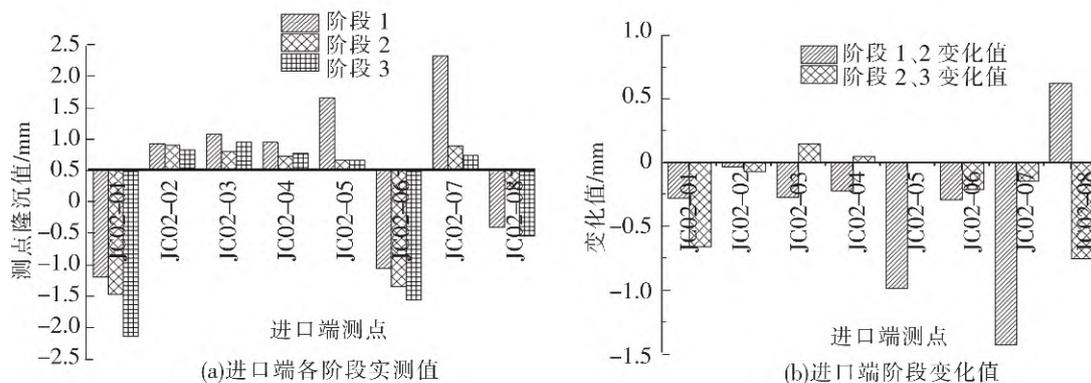


图 8 隧道掘进前后进口端测点沉降变化

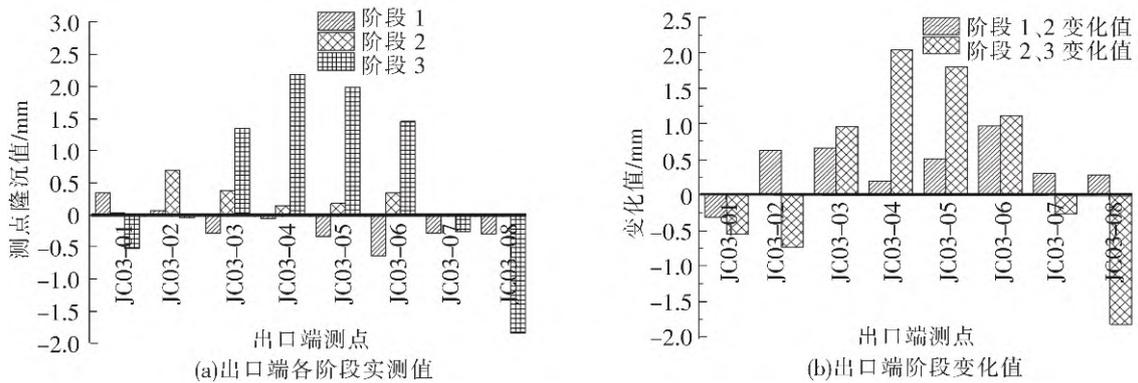


图 9 隧道掘进前后出口端测点沉降变化

以下主要对保护建筑物迎泽阁在 3 个阶段的具体情况采用 ANSYS 软件进行数值模拟,并对比各阶段模拟结果与实测数值。

### 3.2 盾构抵达迎泽阁前

本阶段隧道开挖面开挖至离洞口水平距离 30 m 处,此时进行模拟沉降运算,得出模型地层沉降云图如图 10 所示。

通过模型沉降云图,对迎泽阁监测点进行统计归纳,并将计算值与实测值对比,如图 11 所示,监测点 JC01-01、JC01-02 以及 JC01-04 处出现较大的差异沉降。此时迎泽阁整体向前以及向靠近隧道一侧倾斜。

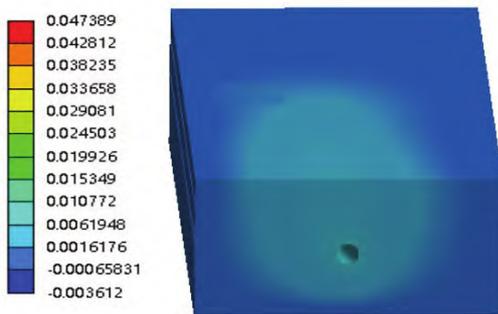


图 10 迎泽阁前地层沉降云图

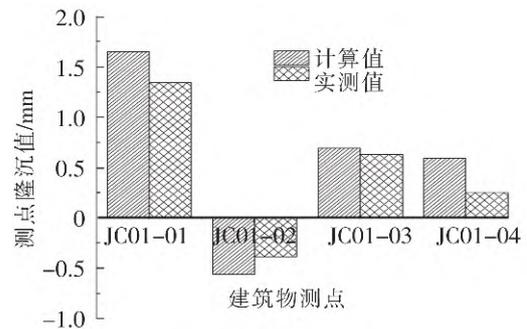


图 11 阶段 1 迎泽阁各监测点沉降对比

### 3.3 盾构掘进至迎泽阁正侧方

本阶段隧道掘进至离洞口水平距离 80 m 处,开挖面已离开离迎泽阁最近点,盾构整体还处于最近点附近,沉降最大值出现在盾尾附近,此时进行模拟沉降运算,得出模型地层沉降云图如图 12 所示。

通过模型沉降云图,对迎泽阁监测点进行统计归纳,并将计算值与实测值对比,如图 13 所示,监测点 JC01-01 和 JC01-02 处出现较大的差异沉降。此时迎泽阁各监测点相对于阶段 1 抵达迎泽阁前差异沉降进一步扩大,整体向着隧道一侧的倾斜度进一步增大。

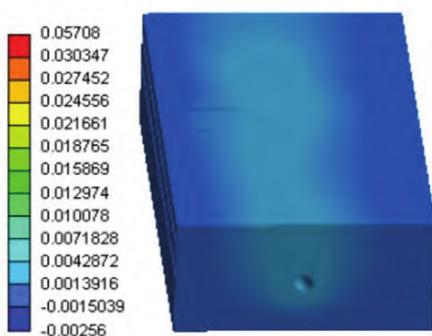


图 12 盾构掘进至迎泽阁地层沉降云图

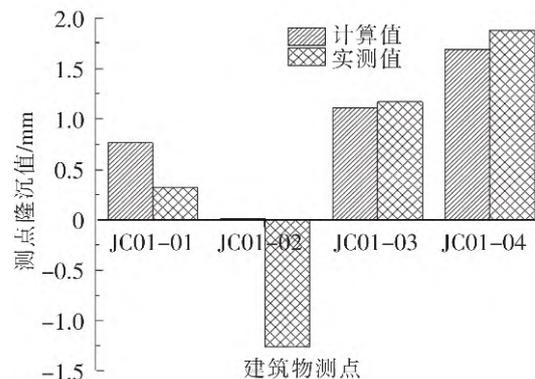


图 13 阶段 2 迎泽阁各监测点沉降对比

### 3.4 盾构远离迎泽阁后

本阶段隧道掘进至离洞口水平距离 130 m 处,盾构整体已掘进离开离迎泽阁最近点,了解此阶段隧道的平稳状态,各测点发生变化。此时进行模拟沉降运算,得出模型地层沉降云图如图 14 所示。

通过模型沉降云图,对迎泽阁监测点进行统计归纳,并将计算值与实测值对比,如图 15 所示,监测点 JC01-01、JC01-02 以及 JC01-03 处出现较大的差异沉降。此时迎泽阁各监测点相对于阶段 2 抵达迎泽阁前差异沉降进一步扩大,容易发生建筑倾斜,尤其当盾尾远离时,施工时应加以控制。

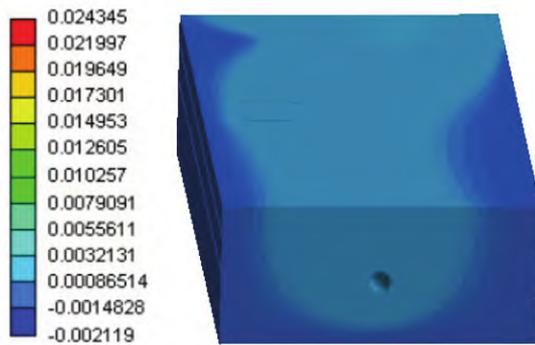


图 14 盾构远离迎泽阁地层沉降云图

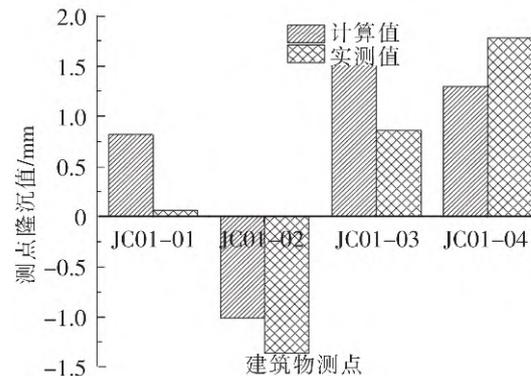


图 15 阶段 3 迎泽阁各监测点沉降对比

### 3.5 实测数据与模拟计算数据差异分析

通过上述数据对比分析,仿真模型计算数值已很贴近盾构施工所引起的地层以及附近建筑物的沉降态势,其误差值大部分处于合理范围内。计算模型所呈现的地层位移变化、地层变形波及范围及沉降速率、邻近建筑物沉降能够较为理想地反映实际工程施工情况。总体上看,出现差异主要原因如下<sup>[14-15]</sup>:

(1) 假定建立的地层模型所满足的水平分布状况,其无法完全模拟实际工程现状。

(2) 在模拟工程实际施工过程中,盾构的推进压力以及注浆压力都在不断变化,因此,仿真模拟时只能选取一定范围内的平均数值,故也会造成一定偏差。

(3) 各土层具体参数大部分由室内试验获得,其与现场土层仍存在一定差异;除此之外,计算模型假定地下水已处理完毕,处于理想状况未考虑地下水的影响。

(4) 对于实际地层分布状况难以量化的变量将其看作为匀质、等厚的替代层,依据施工经验以及室内试验得出的数据,对各模型材料参数进行选定,因此计算求解不够精确,也会造成一定误差。

## 4 结论

(1) 现场监测为全自动监测,采用压力式静力水准仪、计算机外部收集模块以及数传模块将采集到的监测数据通过 5G 信号上传至网络平台,相比较于传统监测,监测数据更精确,更稳定以及更全面,能够及时反馈数据变化。

(2) 在大坡度盾构隧道施工过程中,随着坡度的提升,覆土厚度逐渐减小,与此同时地表沉降值增大,应采取工程措施,减少开挖对地表可能造成的不良影响。这对于大坡度盾构施工具有一定的理论指导意义。

(3) 所研究的隧道具有大曲率的特点,分析表明盾构在掘进进程中,机身只能不断调整角度才能完成转弯过程,管片的拼装错缝值增大,支护强度降低,为保证施工安全,应增强注浆强度,弥补管片错缝影响,降低地表沉降,保证建筑物稳定。这对于大曲率隧道施工具有一定的理论指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] 廖少明, 余炎, 彭芳乐. 盾构近距离穿越相邻隧道施工的数值解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 25(S2): 223-226.
- [2] 张子新, 胡文, 刘超. 地面出入式盾构法隧道新技术大型模型试验与工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2161-2169.
- [3] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[R]. Mexico City: State of the Art Report, 1969: 225-290.

- [4] Rowe R K, Lo K Y, Kack G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(1): 11-22.
- [5] 周健, 陆丽君, 贾敏才. 基于 FLAC3D 数值方法的盾构隧道地层损失率研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 902-907.
- [6] 郭幛. 盾构慢速掘进(停机)沉降影响因素及控制措施探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(6): 701-709.
- [7] 卢岱岳, 王士民, 何川, 等. 新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 108-116.
- [8] 孙志杰. 不同空间位置滑坡对隧道支护结构的作用效果数值分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(4): 34-39.
- [9] 秦祎文, 杨桃, 郭昊天, 等. 装配式地铁车站地震响应数值分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(4): 80-87.
- [10] 赵德深, 陈枫, 朱训国. 盾构双隧道衬砌结构应力与变形的数值模拟[J]. 金属矿山, 2010, 39(6): 51-53.
- [11] 何刚, 杨金虎, 陈庆. 浅埋回填土隧道开挖的拱顶和地表沉降控制探讨[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(S1): 105-110.
- [12] 姜析良, 崔奕, 赵保健. 盾构隧道施工对邻近建筑物的影响[J]. 天津大学学报, 2008, 41(6): 725-730.
- [13] 夏军武, 袁迎曙, 董正筑. 采动区建筑物地基、独立基础与框架结构共同作用的力学模型[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 33-37.
- [14] 于亚军, 贾紫涵, 罗丽娇, 等. 高速公路隧道施工事故三维智能识别与预控技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(2): 80-86.
- [15] 黄明辉, 陈乐意. 二元结构地层基坑嵌岩支护变形性状研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(4): 93-100.

## Studies on Ground Surface and Building Settlement Caused by Shield Construction of Taiyuan Metro

Jia Baohong<sup>1</sup>, Wang Binghan<sup>2</sup>, Xu Guiyang<sup>3</sup>, Wang Pengfei<sup>4</sup>

(1. Taiyuan Rail Transit Group Co. Ltd., Taiyuan 030002, China;

2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Beijing Key Laboratory of Service Performance Guarantee of Urban Rail Transit Vehicles, Beijing 100024, China;

4. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The connecting section of Taiyuan No.1 and No.2 subway is located near Danan Gate station, and the construction method of open excavation and shield is adopted. This tie line is characterized by large curvature, large slope, complex and sensitive geological conditions. The shield section passes through Yingze Park, and the disturbance of its excavation to the surrounding soil will cause uneven settlement of surface buildings. In order to control the impact of soil disturbance on buildings during shield tunneling, monitoring points were arranged in key areas to monitor the settlement of soil and buildings. At the same time, the research analyzed the three-dimensional modeling of some risk points in the shield tunnel by the finite element software ANSYS, and the calculated data were compared with the monitoring data collected on site to obtain the impact of shield position change on the soil and building settlement at the monitoring point.

**Key words:** shield tunnel; adjacent building; ground surface settlement; ANSYS