

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.06.016

富水细砂地层盾构斜向超近距下穿 双洞双线暗挖站施工技术

易领兵¹, 陈庆怀¹, 孟旭央², 杜明芳³, 闫文博², 吴程浩⁴, 杨涌跃⁴

(1. 中国交建轨道交通事业部, 北京 100088; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 3. 河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450001; 4. 中交铁道设计研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要:为研究富水细砂地层某盾构区间斜向超近距下穿施工对既有地铁站变形的影响,文章以临近既有地铁站暗挖段的新建地铁盾构区间工程为背景,对地铁盾构区间工程施工进行设计,并用MIDAS计算分析程序对富水细砂地层盾构斜向超近距下穿既有地铁站施工过程进行数值计算分析。总结了盾构斜向超近距下穿施工过程中既有地铁站位移变化特征;研究了既有地铁站明暗挖交界处变形缝差异沉降规律;分析了既有地铁站轨道沉降变化趋势;整理施工监测数据结果并与模拟计算趋势比对,变化规律基本一致,侧面印证了仿真计算的准确性。

关键词:富水细砂地层;盾构区间;斜向超近距下穿;地铁站位移;变形缝差异沉降;轨道沉降

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)06-0822-07

Construction technology of shield tunneling underpassing double tunnel and double track underground excavation station in inclined ultra-close distance in water-rich fine sand stratum

YI Lingbing¹, CHEN Qinghuai¹, MENG Xuyang², DU Mingfang³,
YAN Wenbo², WU Chenghao⁴, YANG Yongyue⁴

(1. CCC Rail Transit Division, Beijing 100088, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 4. CCC Railway Consultants Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to study the influence of inclined ultra-close shield underpass construction on the deformation of existing metro station in water-rich fine sand stratum, the newly-built metro shield section near the underground excavation section of an existing metro station is taken as an example, and MIDAS program is used to calculate and analyze the shield construction process underpassing the existing metro station in inclined ultra-close distance in water-rich fine sand stratum. The characteristics of the displacement variation of the existing metro station in the process of the shield construction are summarized, the differential settlement law of the deformation joint at the junction of the open and underground excavation of the existing metro station is studied, and the variation trend of the track settlement of the existing metro station is analyzed. The variation rules obtained from the monitoring data of the construction are basically consistent with those of simulation calculation, which proves the accuracy of simulation calculation.

Key words: water-rich fine sand stratum; shield section; inclined ultra-close underpass; metro station displacement; differential settlement of deformation joint; track settlement

收稿日期:2021-05-05;修回日期:2022-12-21

基金项目:河南省科技厅自然科学基金资助项目(162102210188);郑州交通重点工程建设管理中心横向委托资助项目(51000128)

作者简介:易领兵(1988—),男,河南信阳人,中国交建轨道交通事业部高级工程师,通信作者,E-mail:877800536@qq.com;

陈庆怀(1971—),男,河北沧州人,中国交建轨道交通事业部教授级高级工程师;

孟旭央(1973—),男,河南叶县人,黄河勘测规划设计研究院有限公司教授级高级工程师;

杜明芳(1964—),女,河南郑州人,博士,河南工业大学教授,硕士生导师。

0 引言

城市轨道交通为线性工程,在城市地下空间建设时,往往不可避免地需要下穿既有地铁隧道或地上建筑,可能导致重大安全事故发生,这将无疑增大地铁盾构施工的风险^[1-3]。文献[4]通过数值模拟、经典力学理论、实测分析等方法,研究了盾构隧道穿越既有车站的变形控制标准;文献[5]采用简化理论模型、曲线公式、实测分析等方法,研究了新建双线隧道下穿施工对既有隧道产生的沉降和弯矩的影响;文献[6]通过动态监测数据,优化盾构施工参数,研究了盾构机与已建隧道相对位置不同时,盾构施工对已建地铁隧道位移的影响;文献[7]通过资料调研、数值模拟、现场试验和监控测量等方法,研究了砂土地层中盾构隧道超近距离下穿既有隧道的变形控制措施,得到砂土地层中盾构施工参数值;文献[8]通过数值模拟分析,研究了预埋桩基对既有车站变形控制的影响;文献[9]采用数值模拟分析,研究了黄土地区盾构隧道近距离下穿既有线的规律及控制标准;文献[10]通过对既有隧道沉降的数值模拟,结合现场监测数据及盾构施工参数的分析,研究双线盾构下穿时既有地铁盾构隧道的沉降规律及控制措施;文献[11]通过对既有隧道沉降的数值模拟和现场监测数据、盾构施工参数的分析,研究了盾构下穿既有盾构隧道时施工参数的合理取值;文献[12]通过优化盾构机技术参数配置、渣土改良技术,研究了盾构施工超近距离下穿对既有出入段线双连拱暗挖隧道的影响;文献[13]通过分析监测数据的变化规律,采取土体加固、加强底板配筋,研究了盾构隧道下穿施工对既有运营市政隧道的影响;文献[14]采用数值模拟分析,对比分析了地层不加固、超前管棚加固、地表注浆加固、运营隧道内加内箍支撑及MJS工法加固等多种方案对既有运营隧道的影响;文献[15]通过现场调研、数值模拟和现场监测等方法,进行了盾构施工参数对轨道既有隧道和轨道高差的沉降规律研究。

上述文献较多研究盾构下穿施工对既有隧道、车站、市政管线的影响,而对富水细砂地层中盾构超近距下穿地铁站的施工研究较少,富水细砂地层条件下盾构斜向超近距下穿对上部地铁站的研究涉及也较少。综合以往专家学者的研究成果,结合本课题工程背景,本文研究富水细砂地层条件下地铁盾构区间斜向超近距下穿施工对地铁

站的影响,研究成果为后续类似工程提供一定的参考。

1 工程概况

1.1 穿越既有站段新建盾构区间概况

盾构区间内径5.5 m,管片厚0.35 m,外径6.2 m,整体从东北方向先左线、后右线施工顺序连续斜向穿越既有地铁站暗挖段。左线以 69.06° 小角度穿越,右线以 67.86° 小角度穿越,穿越暗挖段宽度约24.8 m。左、右线盾构区间外皮距地铁站暗挖段初支外皮垂直净距仅0.75 m。

整体穿越地铁站范围左、右线盾构区间结构外皮顶覆土18.665 m、底埋深24.865 m,且完全处于④细砂地层,地下水位位于地表以下4.5 m,盾构区间所处地层完全为富水细砂地层,该细砂地层受外界扰动后在富水区流动性很强,盾构穿越过程潜在涌水涌砂风险极高。

1.2 地铁站概况

既有地铁站整体呈东西走向跨南北大道路口偏东西大路南侧敷设,车站东西向总长265.1 m。其中西端明挖段总长64.7 m,结构型式为地下双层三跨结构,采取明挖法施作;中间单洞单线+3组联络通道暗挖段总长63.6 m,结构型式为单洞单线结构,采取暗挖法施作;东端明挖段总长136.8 m,结构型式为地下双层三跨结构,采取明挖法施作。

东、西两端明挖段顶板覆土约3.0 m,底板埋深约16.0 m,下沉段底板埋深约18.5 m,宽度22.1 m,外扩段宽度26.0 m;中间暗挖段顶板覆土约8.7 m,底板埋深约17.5 m,宽度23.3 m。

中间暗挖段内距离东、西两端明挖段与中间暗挖段分界位置2 m处设置变形缝,西端变形缝一距离左线盾构外皮最小距离18.64 m,东端变形缝二距离右线盾构外皮最小距离8.15 m。

车站所处地层自上而下依次分布为2.7 m厚①杂填土、7.5 m厚②粉质黏土、7.5 m厚③黏质粉土、10.0 m深厚④细砂层。地下水位埋深4.5 m。东、西两端明挖段顶板基本位于②粉质黏土地层,底板位于④细砂地层;中间暗挖段顶板位于②粉质黏土地层,底板基本位于③黏质粉土和④细砂地层交界面。

中间暗挖段初支外皮向外2.6 m范围已提前采取WSS无收缩后退式深孔注浆加固措施施作。平面位置关系及监测点平面布置图如图1所示,剖面位置关系如图2所示。

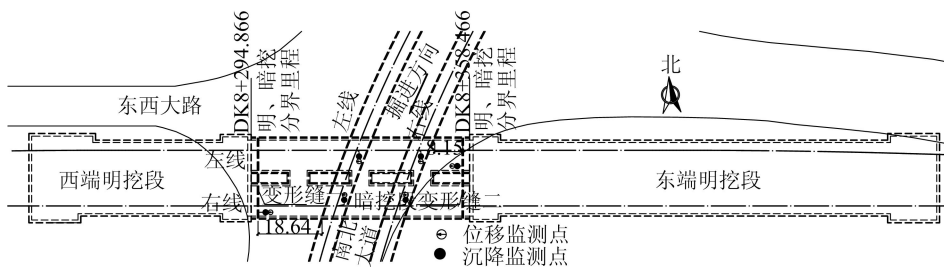


图 1 平面位置关系及监测点平面布置图

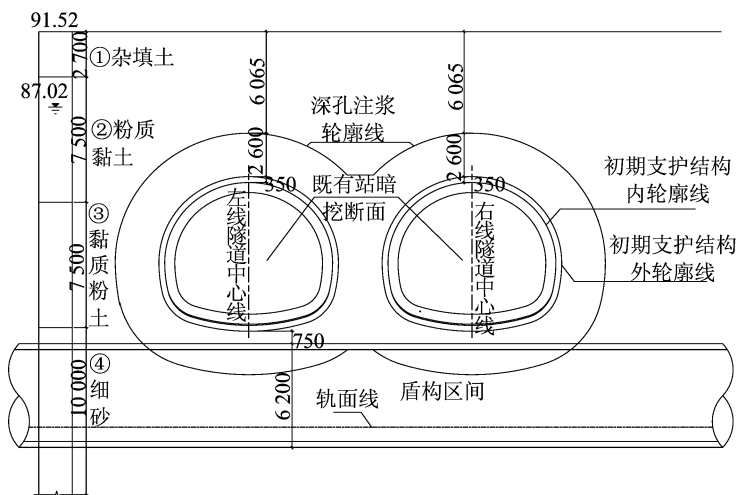


图 2 剖面位置关系图

2 有限元计算

2.1 计算模型

针对富水细砂地层,采用 MIDAS 有限元计算程序建立模型,整体模型除顶面为自由面以外,其余四周四面及底面均采取固定约束固定,结构与土体接触面采取析取单元型式创建,软件中采取接触对定义约束连接。模型的长、宽、高尺寸分别为 400、200、60 m。岩土体采用修正莫尔-库伦弹塑性模型,采用实体单元模拟;车站结构墙板、暗挖初支及二衬等采用板单元模拟;结构梁、柱、连梁、轨道等采用梁单元进行模拟。采用线弹性本构模型模拟新建盾构区间与既有地铁站等,如图 3、图 4 所示。

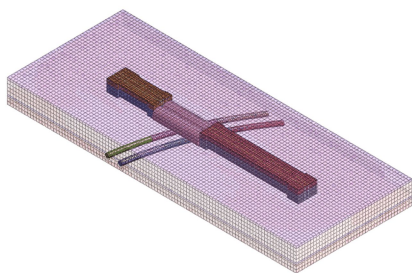


图 3 地层结构模型

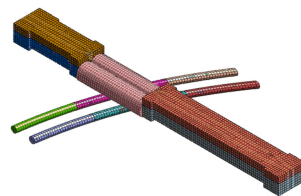


图 4 盾构区间与地铁站相对位置关系

为研究盾构斜向超近距下穿施工过程中既有地铁站位移变化特征及既有地铁站明暗挖交界处变形缝差异沉降规律,借鉴以往工程经验及软件仿真计算理论,同时按照本工程施工组织计划先左线盾构穿越然后右线盾构,穿越皆按照盾构掘进接近车站、盾构掘进穿越车站、盾构掘进远离车站三阶段进行仿真模拟计算研究,盾构掘进按照每一环挖土(1.5 m 环宽)、管片成环封闭进尺步骤循环进行施工。三阶段如下:新建盾构区间左线盾构掘进至穿越既有地铁站前外 6 m 处→左线盾构穿越既有地铁站至穿站后外 6 m 处→左线盾构远离既有地铁站→右线盾构掘进至穿越既有地铁站前外 6 m 处→右线盾构穿越既有地铁站至站后外 6 m 处→右线盾构远离既有地铁站。

2.2 施工步骤

详细施工步骤如下:

- (1) 工况 1. 初始地应力还原。
 - (2) 工况 2. 左线盾构掘进至穿越既有地铁站前外 6 m 处。
 - (3) 工况 3. 左线盾构穿越既有地铁站至站后外 6 m 处。
 - (4) 工况 4. 左线盾构远离既有地铁站。
 - (5) 工况 5. 右线盾构掘进至穿越既有地铁站前外 6 m 处。
 - (6) 工况 6. 右线盾构穿越既有地铁站至站后外 6 m 处。
 - (7) 工况 7. 右线盾构远离既有地铁站。
- 土体及结构物理力学参数见表 1 所列。

表 1 土体及结构物理力学参数

材料	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	E / MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)
①杂填土	18.0	2.5	0.24	6.0	9
②粉质黏土	19.1	7.0	0.27	13.5	29
③黏质粉土	19.5	7.0	0.27	14.3	31
④细砂	20.0	16.0	0.25		28
加固区	23.0	450.0	0.20		
钢轨	78.5	2.0×10^5	0.30		
结构	25.0	35.5×10^3	0.20		

3 计算结果

3.1 车站位移

为节约篇幅,不再逐一列出每一工况计算云图,仅列出工况 4 和工况 7 的计算结果,如图 5、图 6 所示。

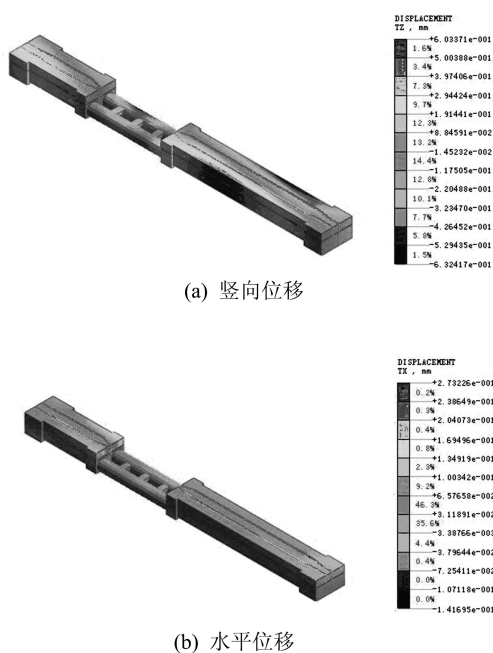


图 5 工况 4 地铁站竖向、水平位移变形云图

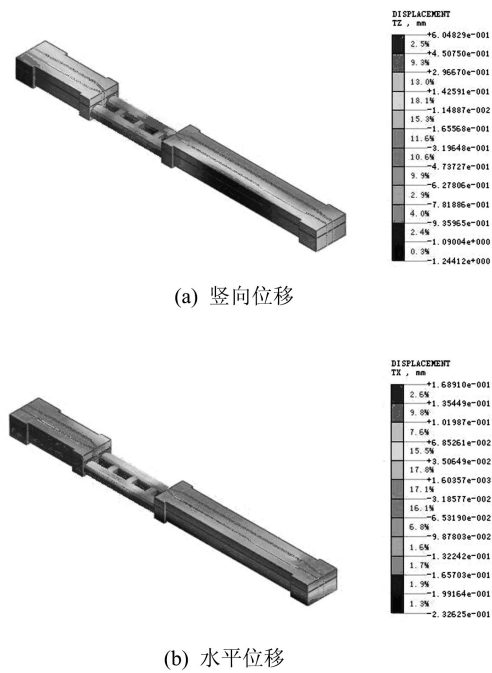


图 6 工况 7 地铁站竖向、水平位移变形云图

盾构区间左线施工后主要影响盾构区间下穿处既有地铁站暗挖段,两侧明挖段沉降影响较小,暗挖段主体变形由下穿区域向两侧逐渐减小。最大沉降值 1.02 mm,位于暗挖段 DK8+324.6 附近,沉降槽宽度约为 17.5 m(DK8+317.1~DK8+334.6,沉降大于 0.5 mm 范围);暗挖段沉降变形主要受垂直下穿段施工影响,既有地铁站两侧 6 m 范围外新建盾构区间施工新增沉降小于 0.10 mm,基本无影响。

水平变形相对较小,最大水平变形为 0.22 mm,位于西端车站明挖段主体底板部位。本阶段施工各部位以靠近盾构区间的沉降变形为主。

盾构区间右线主要影响盾构区间下穿处既有地铁站暗挖段,东端明挖段邻近处也产生一定沉降,西端明挖段基本无影响,地铁站主体变形由下穿区域向两侧逐渐减小。最大沉降值为 1.53 mm,位于暗挖段东侧(DK8+344.5);沉降槽宽度约为 42 m(DK8+316.5~DK8+358.5,沉降大于 0.5 mm 范围),暗挖段沉降变形主要受垂直下穿段施工影响,既有地铁站两侧 6 m 范围外新建盾构区间施工新增沉降小于 0.10 mm,基本无影响。

水平变形相对较小,最大水平变形为 0.24 mm,位于东端明挖段底板部位。本阶段施工,各部位以靠近盾构区间的沉降变形为主。

地铁站位移曲线如图 7 所示。

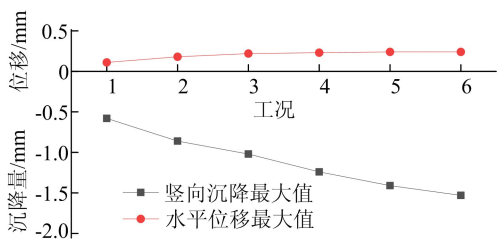


图 7 地铁站位移曲线

分析上述结果可以看出:随左线盾构掘进远离既有地铁站,车站沉降和水平位移逐渐增大,沉降最大值达到 1.00 mm,水平位移最大值达到 0.20 mm,水平位移值仅为沉降值 20%,地铁站变形以沉降为主。随右线盾构掘进远离既有地铁站,车站沉降和水平位移继续逐渐增大,但沉降最大值增幅较大达到 1.53 mm,增幅比例 53%;水平位移最大值增幅较小,仅达到0.24 mm,增幅比例 20%;水平位移值仅为沉降值 15.7%,地铁站变形以沉降为主。

3.2 变形缝差异沉降

选择不同位置点进行结构的变形缝统计与分

析,如图 8、图 9 所示。图 9 中,1~5 分别表示顶拱跨中、顶拱支座、侧墙跨中、底板跨中、底板支座。变形缝位置变形量见表 2 所列。

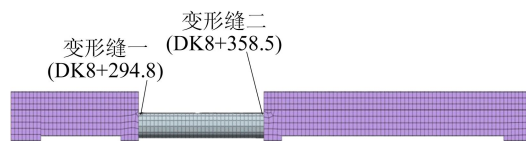


图 8 选取变形缝位置

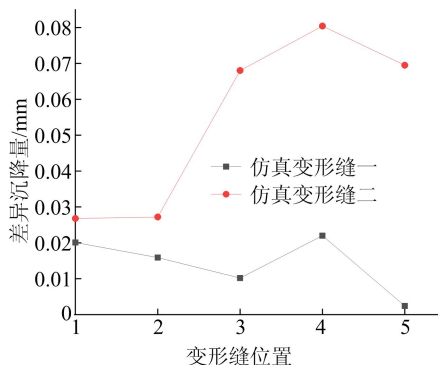


图 9 仿真变形缝差异沉降量

表 2 变形缝位置变形量

单位:mm

竖向变形位置	顶拱跨中	顶拱支座	侧墙跨中	底板跨中	底板支座	最大值
暗挖段	0.099 4	0.106 3	0.101 1	0.100 6	0.065 3	
变形缝一 明挖段	0.079 3	0.090 4	0.090 9	0.078 6	0.062 9	
差值	0.020 1	0.015 9	0.010 2	0.022 0	0.002 4	0.022 0
暗挖段	-0.304 6	-0.228 4	-0.216 1	-0.323 7	-0.268 3	
变形缝二 明挖段	-0.277 8	-0.201 2	-0.148 1	-0.246 3	-0.198 8	
差值	0.026 8	0.027 2	0.068 0	0.080 4	0.069 5	0.080 4

根据计算结果,2 条变形缝中,最大差异沉降位于车站主体暗挖段底板。

跨中 DK8+358.5 处的变形缝二,结构两侧的差异变形量最大为 0.080 4 mm,不会影响车站结构的正常使用。

3.3 轨道沉降

提取施工后地铁站双线铺轨处测线竖向位移值,绘制轨道沉降曲线如图 10 所示。

由图 10 轨道沉降曲线可知,地铁站影响范围内双线轨道主要受盾构区间下穿影响,随左线盾构掘进远离既有地铁站,左、右线轨道沉降量均逐渐增大,左线沉降最大值达到 0.59 mm,右线沉降最大值达到 0.54 mm;随右线盾构掘进远离既有地铁站,左、右线轨道沉降量均继续逐渐增大,左线沉降最大值达到 0.89 mm,增幅比例 50.8%,右线沉降最大值达到 0.81 mm,增幅比

例 50.0%。

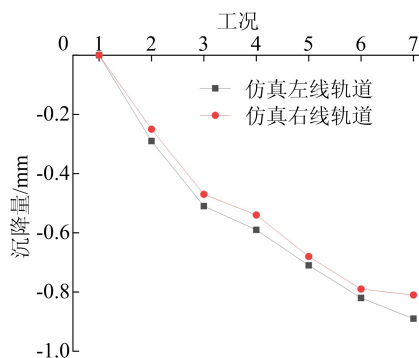


图 10 轨道沉降曲线

4 施工监测分析

整理施工过程中各桥实际监测数据并汇总,结果如图 11 所示。

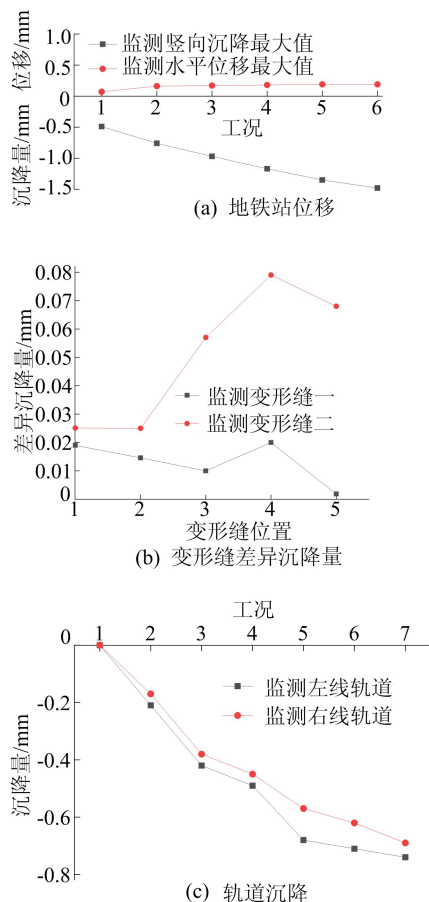


图 11 施工监测地铁站位移、差异沉降量及轨道沉降

监测结果表明:

(1) 随左线盾构掘进远离既有地铁站,车站沉降和水平位移逐渐增大,沉降最大值达到 0.97 mm,水平位移最大值达到 0.17 mm,水平位移值仅为沉降值 17.5%,地铁站变形以沉降为主。随右线盾构掘进远离既有地铁站,车站沉降和水平位移继续逐渐增大,但沉降最大值增幅较多达到 1.48 mm,增幅比例 52.6%;水平位移最大值增幅较小仅达到 0.19 mm,增幅比例 11.8%;水平位移值仅为沉降值的 12.8%,地铁站变形以沉降为主。

(2) 根据计算结果,2条变形缝中,最大差异沉降位于车站主体暗挖段底板。跨中 DK8+358.5处变形缝二,结构两侧的差异变形最大值为 0.079 mm,不会影响车站结构的正常使用。

(3) 由轨道变形结构可知,地铁站影响范围内双线轨道主要受盾构区间下穿影响,随左线盾构掘进远离既有地铁站,左、右线轨道沉降均逐渐增大,左线沉降最大值达到 0.49 mm,右线沉降最大值达到 0.45 mm;随右线盾构掘进远离既有地铁站,左、右线轨道沉降均继续逐渐增大,左线沉降最大值达到 0.74 mm,增幅比例 51.0%,右

线沉降最大值达到 0.69 mm,增幅比例 53.3%。

从图 7、图 9~11 可以看出,监测数值与仿真计算结果及发展趋势基本一致,总体而言监测数据均小于仿真计算结果,但两者数据显示最大值发生位置基本一致,从而印证了模型的准确性。

5 结 论

本文对富水细砂地层盾构斜向超近距下穿既有地铁站施工过程进行了数值计算分析。整理施工监测数据结果并与模拟计算结果比对,变化规律基本一致,因此印证了仿真计算的准确性。结论如下:

(1) 随左线盾构掘进远离既有地铁站,车站沉降和水平位移逐渐增大。施工监测显示:车站沉降最大值为 1.48 mm,位移最大值为 0.19 mm,均小于模拟计算结果;此外地铁站站沉降及位移变化趋势与模拟结果基本一致。

(2) 最大差异沉降位于车站主体暗挖段底板。变形缝二结构两侧的差异变形最大为 0.080 4 mm,不会影响车站结构的正常使用。施工监测数据显示:差异沉降发生最大位置为变形缝二,最大值为 0.079 0 mm,与模拟计算结果基本一致。

(3) 随左线盾构掘进远离既有地铁站,左、右线轨道沉降均逐渐增大。监测数据显示:左线沉降最大值达到 0.74 mm,右线沉降最大值达到 0.69 mm,小于但接近模拟计算结果。

[参 考 文 献]

- [1] 陈庆章,漆伟强,江玉生,等.全断面富水砂层浅埋盾构隧道下穿平房群施工参数研究[J].现代隧道技术,2020,57(2):169-175.
- [2] 王明胜,姜冲.成都地铁盾构区间隧道下穿锦江关键施工技术研究[J].现代隧道技术,2019,56(增刊2):619-624.
- [3] 李围,任立志,孟庆明,等.盾构区间重叠隧道下穿高速铁路轨道群加固技术体系研究[J].现代隧道技术,2018,55(6):191-196.
- [4] 张运涛.地铁盾构隧道下穿既有地铁车站变形控制标准探讨[J].铁道标准设计,2021,65(11):1-7.
- [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(增刊2):3586-3594.
- [6] 张琼方,夏唐代,丁智,等.盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制[J].岩土力学,2016,37(12):3561-3568.
- [7] 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[J].铁道标准设计,2020,64(3):123-129,135.

(下转第 848 页)

- [15] 赵媛,于鹏.我国煤炭重要空间流动的基本格局与流通过道[J].经济地理,2007,27(2):196-200.
- [16] 成升魁,徐增让,沈镭.中国省际煤炭资源流动的时空演变及驱动力[J].地理学报,2008,63(6):603-612.
- [17] 姜磊,季民河.基于空间异质性的中国能源消费强度研究:资源禀赋、产业结构、技术进步和市场调节机制的视角[J].产业经济研究,2011(4):61-70.
- [18] 贾祥英,闫强,邢万里,等.全球大宗矿产资源贸易格局演变及其影响因素分析[J].中国矿业,2019,28(11):15-20.
- [19] 薛冰,肖骁,李京忠,等.基于 POI 大数据的沈阳市住宅与零售业空间关联分析[J].地理科学,2019,39(3):442-449.
- [20] 禹文豪,艾廷华,杨敏,等.利用核密度与空间自相关进行城市设施兴趣点分布热点探测[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(2):221-227.
- [21] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. Geographically weighted regression: modelling spatial non-stationarity[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series D: The Statistician, 1998, 47(3): 431-443.
- [22] 王珂靖,蔡红艳,杨小唤.多元统计回归及地理加权回归方法在多尺度人口空间化研究中的应用[J].地理科学进展,2016,35(12):1494-1505.
- [23] 沈明,沈镭,钟帅,等.基于生态敏感条件的中国资源型城市去产能空间格局优化[J].资源科学,2016,38(10):1962-1974.
- [24] 上海市统计局,国家统计局上海调查总队.上海统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [25] 江苏省统计局,国家统计局江苏调查总队.江苏统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [26] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队.安徽统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [27] 浙江省统计局,国家统计局浙江调查总队.浙江统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [28] 江西省统计局,国家统计局江西调查总队.江西统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [29] 湖北省统计局,国家统计局湖北调查总队.湖北统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [30] 湖南省统计局,国家统计局湖南调查总队.湖南统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [31] 重庆市统计局,国家统计局重庆调查总队.重庆统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [32] 云南省统计局.云南统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [33] 贵州省统计局,国家统计局贵州调查总队.贵州统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [34] 四川省统计局,国家统计局四川调查总队.四川统计年鉴:2018[M].北京:中国统计出版社,2018.

(责任编辑 张淑艳)

(下转第 827 页)

- [8] 许有俊,孟贞,李志成,等.盾构隧道近距下穿既有地铁车站沉降控制措施研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2018,49(6):1044-1050.
- [9] 王立新,汪珂,李储军,等.黄土地区地铁盾构隧道近距离下穿既有有线影响规律及控制标准研究[J].铁道标准设计,2019,63(10):124-130,158.
- [10] 杨成永,马文辉,彭华,等.地铁双线盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J].铁道工程学报,2018,35(7):91-98.
- [11] 马文辉,彭华,杨成永.盾构近距下穿既有地铁盾构隧道施工参数控制[J].西南交通大学学报,2018,53(1):119-127.
- [12] 温克兵,梁玉钊,刘宸岩.盾构超近距离下穿既有地铁风险分析及控制措施[J].现代城市轨道交通,2017(12):35-38.
- [13] 夏金春.地铁盾构正交下穿隧道施工风险控制措施[J].隧道建设,2017,37(增刊1):111-115.
- [14] 钟可,傅鹤林,张加兵.富水砂卵石地层中超近距离盾构下穿既有运营隧道加固方案研究[J].公路工程,2018,43(5):10-16,68.
- [15] 来弘鹏,郑海伟,何秋敏,等.砂土地层盾构隧道小角度斜下穿既有隧道施工参数优化研究[J].中国公路学报,2018,31(10):130-140.

(责任编辑 张 镗)